



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANNA ETELÄÄHO
SATAKUNNAN VAIHEMAAKUNTAKAAVAN 1 TUULIVOIMALA-
ALUEIDEN VISUALISOINTI
Diplomityö

Tarkastaja: professori Tarmo Lipping
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
14. elokuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Tietotekniikan koulutusohjelma

ETELÄÄHO, ANNA: Satakunnan vaihemaakuntakaavan 1 tuulivoimala-alueiden visualisointi

Diplomityö, 58 sivua

Joulukuu 2013

Pääaine: Signaalinkäsittely

Tarkastaja: professori Tarmo Lipping

Avainsanat: maastomalli, pintamalli, visualisointi, havainnollistaminen, Satakunnan vaihemaakuntakaava 1, laserkeilaus, ilmakuvien käsittely

Paikkatietoon perustuvan maaston 3D-mallinnuksen avulla on mahdollista havainnollistaa visuaalisesti maisemien muuttumista rakentamisen yhteydessä. Tämän diplomityön taustalla olleen tutkimusprojektin tavoitteena oli Satakunnan alueelle kaavoitettujen tuulivoimala-alueiden visualisointi stillkuva- ja videomateriaalin avulla. Erillisiä tuulivoimala-alueita on Satakunnan vaihemaakuntakaavan 1 ehdotuksessa osoitettu 18 kappaletta. Näistä tutkimuksen toimeksiantaja, Satakuntaliitto, valitsi 11 aluetta mallinnettavaksi. Tuloksena on 18 esittelyvideota, joissa kierretään tuulivoimala-alue ilmasta käsin tai liikutaan alueen sisällä teitä pitkin.

Jokaisesta alueesta tehtiin kolmiulotteinen malli, joka käsittää maanpinnan sekä puuston. Maanpinnan korkeuksien mallinnuksessa käytettiin Maanmittauslaitoksen ja Metsäkeskuksen laserkeilausaineistoa. Maanpinnan korkeusmalliin liitettiin Maanmittauslaitoksen ortoilmakuvat alueesta, jolloin tuloksena on maanpinta, joka näyttää samalta kuin ilmakuvassa mutta myötäilee todellisia maaston muotoja. Puut lisättiin malliin 3D-objekteina, joiden paikkojen ja korkeuksien määrittelyssä hyödynnettiin kasvillisuutta kuvaavaa laserkeilaus- eli lidaraineistoa. Myös suunnitellut voimalat ja huoltorakennukset liitettiin malliin 3D-objekteina toimeksiantajalta saatuja paikkatietoja hyväksikäyttäen. Malliin lisättiin mittasuhteiden havainnollistamiseksi ja realismisuuden lisäämiseksi myös rakennuksia, voimalinjoja, autoja ja ihmisiä.

3D-mallien avulla tuotettiin runsaasti stillkuvia, joista koostettiin muutaman minuutin pituisia esittelyvideoita. Toimeksiantaja luonnosteli kartalle reitit, joita videokameran haluttiin seuraavan, ja niiden perusteella tehtiin tietokonekäsittelyyn sopivat kameralinjat. Koko lähdeaineiston käsittely kameralinjat mukaan lukien suoritettiin pääsääntöisesti MATLAB- ja ArcGIS -ohjelmistojen avulla.

Työssä korostui laserkeilausaineiston ja ilmakuvien kohdalla suurten tietomäärien käsittelyn hankaluus rajallisella muisti- ja laskentakapasiteetilla. Ohjelmakoodien optimointia jouduttiin tekemään runsaasti, jotta aineiston esikäsittely ei olisi vienyt liikaa aikaa. Myös kolmiulotteisten mallien käsittelyn raskaus ArcScene-sovelluksessa asetti rajoituksensa esimerkiksi 3D-puuobjektien tiheydelle ja ulkonäölle. Lopputulos oli kuitenkin visuaalisesti varsin tyydyttävä ja videoita on esitelty muun muassa yleisötilaisuuksissa sekä videoiden jakamiseen tarkoitetulla Youtube-sivustolla internetissä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Information Technology

ETELÄÄHO, ANNA: Visualization of Planned Wind Farms in Satakunta

Master of Science Thesis, 58 pages

December 2013

Major: Signal Processing

Examiner: Professor Tarmo Lipping

Keywords: terrain model, visualization, Regional Land Use Plan, laser scanning

3D modeling based on geographic information allows the visualization of landscape changes after construction of different man-made structures. This master's thesis stems from a research project whose goal was to visualize areas zoned for wind farms in Western Finland by means of still pictures and animations. There were 18 wind farm areas planned in Satakunta Stage 1 Regional Land Use Plan. The Regional Council of Satakunta – the research customer – chose 11 areas for 3D modeling. The outcome contains 18 video presentations showing the wind farms from air and exploring the view with video camera moving along planned or existing roads nearby.

A 3D surface model with ground and trees was constructed for every chosen area. The ground heights were acquired from the National Land Survey of Finland and the Finnish Forest Centre in the form of laser scanning (LiDAR) data. The orthoimages provided by the National Land Survey were combined with the elevation data, and the result was a surface that looks like orthoimage but conforms with the actual terrain. The trees were added to the model as 3D objects with locations and heights acquired from real LiDAR vegetation data. The windmills and maintenance buildings were added to the model as 3D objects using the data provided by the customer. Residential buildings, power lines, cars and people were also added to better demonstrate the scale and make the model more realistic.

Thousands of still images were produced from the 3D models, and the videos were composed from these images. The average video length was a couple of minutes. The customer had sketched video camera paths to a basic map, and these paths were used as guidelines when designing digital video camera paths suitable for computer processing. All source data, including the camera paths, were processed mainly with MATLAB and ArcGIS software. The difficulty of processing large LiDAR datasets and high resolution aerial photographs with limited amount of computer memory and computing power was encountered during the project. A lot of script optimization had to be done to save the time consumed in data preprocessing. Compromises on forest density and appearance of the 3D tree objects, for example, had to be made due to general heaviness of processing 3D models with the ArcScene software. After all, the final result was visually very satisfactory. The animations have been presented in public hearing meetings and on Youtube, a video sharing website.

ALKUSANAT

Kirjoitin diplomityöni lokakuun 2012 ja tammikuun 2013 välisenä aikana. Työn pohjalla on neljä kuukautta kestänyt työsuhteeni tutkimusapulaisena tuulipuistojen 3D-mallinnukseen liittyvässä tutkimusprojektissa. Tilaustutkimuksen toimeksiantaja oli Satakuntaliitto, jota haluan kiittää saamastani mahdollisuudesta diplomityöni toteuttamiseen. Erityisesti kiitän Satakuntaliiton projektitutkijaa Eeva Paitulaa, jonka kanssa yhteistyö sujui joustavasti.

Työssäni minua ohjasi dosentti Jari Turunen. Hän perehdytti minut työhön ennen kesälomalle lähtöään ja on tarjonnut apua aina kun olen sitä vain osannut kysyä. Esitän hänelle lämpimät kiitokset kaikesta tuesta.

Koko kirjoitusprosessin ajan minulla oli käytössä työskentelypaikka Tampereen teknillisen yliopiston Porin yksikön signaalinkäsittelyn laboratoriossa, mistä haluan kiittää yksikön johtajaa ja työni tarkastajaa, professori Tarmo Lippingiä.

Erityisen suuret kiitokset kuuluvat Teemu Kumpumäelle, joka on tukenut minua koko projektin ajan: ensin työsuhteeni aikana ja sen jälkeen diplomityön kirjoituksessa. Hän ei todellakaan säästellyt vaivojaan auttaessaan minua eteenpäin vaikeimpien paikkojen yli. Suurelta osin Teemun ansiosta lopputuloksesta – tuulivoimala-alueita esittävistä videoista – tuli visuaalisesti parempia kuin uskallettiin toivoakaan.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani ja isovanhempiani vierelläni seisomisesta, kaikesta tuesta ja rakkaudesta.

Porissa 11. marraskuuta 2013

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Tutkimuksen lähtökohdat	3
2.1	Ilmasto- ja energiastrategiat	3
2.2	Satakunnan vaihemaakuntakaava 1 ja mannertuuliselvitys	4
3	Aineistot ja ohjelmistot	8
3.1	Digitaaliset korkeusmallit ja niiden esitystavat.....	8
3.1.1	TIN-malli	9
3.1.2	Rasterimalli	10
3.2	Laserkeilaus	11
3.2.1	Laserkeilaustekniikka	12
3.2.2	LAS-formaatti	14
3.2.3	Laserkeilausaineiston luokittelu Maanmittauslaitoksella	15
3.2.4	Laserkeilausaineiston käyttö	17
3.3	Shape-tietomalli	18
3.4	ArcGIS-ohjelmisto	21
4	Tuulivoimamala-alueiden mallinnus	24
4.1	Mallinnuksessa käytetyt aineistot ja työkalut	25
4.1.1	Laserkeilausaineisto.....	26
4.1.2	Ortoilmakuvat.....	27
4.1.3	Muu aineisto	28
4.1.4	Mallinnuksessa käytetyt sovellukset	30
4.2	Maaston mallintaminen	30
4.2.1	Laserkeilausaineiston käsittely.....	30
4.2.2	3D-objektien käsittely	33
4.3	Ilmakuvien käsittely	36
5	Kuvamateriaalin tuottaminen.....	44
5.1	Kolmiulotteisen mallin luominen.....	44
5.2	Kameralinjat.....	46
5.2.1	Aloitus ilmasta maahan laskeutuen	47
5.2.2	Tietä pitkin	50
5.3	Stillkuvien ja videoiden tuottaminen.....	50
6	Johtopäätökset.....	52
	Lähteet.....	55

TERMIT JA LYHENTEET

ArcGIS	Environmental Systems Research Institute, Inc.:n (ESRI) kehittämä paikkatieto-ohjelmisto joka sisältää mm. ArcScene- ja ArcMap -sovellukset
ArcMap, ArcScene	ArcGIS-tuoteperheen sovellukset kaksi- ja kolmiulotteisen paikkatiedon käsittelyyn ja visualisointiin
DEM	Digital Elevation Model, digitaalinen korkeusmalli
DSM	Digital Surface Model, digitaalinen pintamalli
DTM	Digital Terrain Model, digitaalinen maastomalli
GIS	Geographic Information System, paikkatietojärjestelmä
IMU	Inertial Measurement Unit, inertiamittauslaite
LAS	laserkeilausdatan tallennuksessa käytetty binäärinen tiedostomuoto
LIDAR	Light Detection and Ranging, laservaloon perustuva kaukokartoitustekniikka
MATLAB	Mathworks Inc.:n kehittämä numeeriseen laskentaan tarkoitettu ohjelmisto
MML	Maanmittauslaitos
Python	tulkattava ohjelmointikieli
Shape-tiedosto	ESRI:n kehittämä tallennusformaatti paikkatietokohteille ja niiden ominaisuustiedoille
TIN	Triangulated Irregular Network, epäsäännöllinen kolmioverkko
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto

1 JOHDANTO

Diplomityön aihe pohjautuu sen tilaajan, Satakuntaliiton, tarpeeseen kehittää menetelmä, jolla suurten tuulivoimala-alueiden suunnittelua voitaisiin havainnollistaa osana maakuntakaavoitusprosessia alueiden osallisille, kuten lähiseudun asukkaille, maanomistajille ja viranomaisille. Yhtenä havainnollistamiskeinona päädyttiin toteuttamaan kolmiulotteiset paikkatietoon perustuvat mallit suunnitelluista voimala-alueista. Mahdollisimman tarkka 3D -mallinnus on havainnollistamisen kannalta yksi parhaista menetelmistä. Mallissa voitaisiin periaatteessa liikkua missä tahansa tuulivoimala-alueella ja sen ympäristössä ja selvittää, mihin asti yksittäiset voimat todellisuudessa näkyvät.

Työ tehtiin osana Satakuntaliitossa käynnissä ollutta ympäristöministeriön rahoittamaa pilottihanketta¹, jossa kehitettiin tuulivoimatuotannon maisemavaikutusten havainnollistamismenetelmiä. Alueiden rakentamisen vaikutuksia lähiympäristöön ja maisemaan havainnollistettiin tämän tutkimusprojektin kanssa samanaikaisesti Satakuntaliiton toimesta havainnekuvien ja pallopanoraamaesitysten avulla [1].

Mallintamisen kohteena olivat Satakunnan vaihemaakuntakaavan 1 ne alueet, jotka soveltuvat parhaiten maakunnallisesti merkittävien tuulivoimala-alueiden rakentamiseen ja joista oli saatavilla tarvittava aineisto [2]. Vuonna 2011 Satakuntaliitossa on ympäristöministeriön rahoittamana valmistunut Mannertuulialueet Satakunnassa - selvitys, jossa potentiaaliset tuulivoima-alueet on kartoitettu [3]. Vaihemaakuntakaavan 1 ehdotuksessa on selvitykseen perustuen osoitettu 18 maakunnallisesti merkittävää tuulivoiman tuotantoon soveltuvaa aluetta. Kaavaehdotuksen alueista mallinnettiin tämän työn puitteissa 11 kappaletta. Mallinnettavat alueet valittiin pääasiassa maastomalleihin tarvittavan laserkeilausaineiston saatavuuden perusteella.

Oleellisen reunaehdon työlle muodosti mallinnukseen tarvittavan lähtöaineiston saatavuus. Viime vuosien aikana sekä Maanmittauslaitos että Metsäkeskus ovat toteuttaneet Satakunnan alueella kaukokartoitusprojekteja ja molemmilta löytyy sekä tarvittavaa laserkeilausaineistoa että ilmakuvausaineistoa. Työ toteutettiin tutkimusryhmän yhteydessä, jolla oli aikaisempaa kokemusta näiden aineistojen käsittelystä. 3D-malleja tuulivoimaloista on vapaasti saatavana internetissä. Työn kuluessa osoittautui että parhaaseen lopputulokseen päästiin mallintamalla myös alueen

¹ [42], Liite 2: ”Vuorovaikutusmenetelmien kehittäminen Satakunnan vaihemaakuntakaavan 1 laadinnassa”

puut 3D-objekteina. Diplomityön lopputuloksena oli tarkoitus tuottaa esittelymateriaali stillkuvina ja videoina sovitusta tuulivoimala-alueista.

Diplomityössä on kuvattu koko visuaalisen materiaalin tuotantoprosessi. Luvussa 2 selostetaan yleisempiä taustoja sille, miksi työtä lähdettiin alun perin tekemään ja luvussa 3 esitellään tarvittavat teoreettiset taustatiedot, kuten maaston mallinnuksen perustana olevat korkeusmallit sekä laserkeilaus maastoa kuvaavan aineiston hankintamenetelmänä. Luvussa 3 kuvataan myös mallinnuksessa käytetty ohjelmisto ArcGIS sekä paikkatiedon tallennuksessa käytettävä shape-tietomalli.

Käytännön aineistoon ja sen käsittelyyn syvennyttään luvussa 4. Luvun alussa kappaleessa 4.1 esitellään 3D-mallien rakentamisessa käytetyt laserkeilaus- ja ilmakuva-aineistot sekä Satakuntaliiton aineistot, kuten tuulivoimaloiden sijainti- ja muut tiedot. Samassa kappaleessa mainitaan myös käytetyt ohjelmistot – työ tehtiin suurelta osin MATLAB- ja ArcGIS -ohjelmistojen avulla. Tämän jälkeen kappaleen 4.2 alussa kuvataan periaatteet, joilla aineiston maantieteellinen rajausta tehtiin sekä kappaleessa 4.2.1 maastomallin muodostaminen laserkeilausaineistosta. Kappaleessa 4.2.2 esitellään malleissa käytettyjen kolmiulotteisten objektien – puut, voimalat, sähköpylväät, talot, autot ja ihmiset – tietokoneella tapahtuva esikäsittely ja niiden integrointi valmiiseen 3D-maastomalliin. Ilmakuvien muokkausta käsitellään kappaleessa 4.3.

Luku 5 keskittyy pääasiassa stillkuva- ja videomateriaalin tuottamiseen. Kappaleessa 5.1 vertaillaan lyhyesti kahta eri tapaa mallintaa maanpinta ja puusto. Videokameralinjojen suunnittelu ja tekninen toteutus käsitellään kappaleessa 5.2 ja videoiden tekninen toteutus kappaleessa 5.3. Johtopäätökset ja joitakin projektin aikana esiintyneitä ongelmakohtia esitellään luvussa 6.

2 TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHDAT

Tarve tuulivoimatuotannon kehittämiseksi juontaa juurensa kansainvälisistä ilmasto- ja energiastrategioista. Tässä luvussa käsitellään ensin lyhyesti merkittävimpiä ilmasto- ja energiastrategioita ja sen jälkeen tarkastellaan yksityiskohtaisemmin, miten Satakuntaliitto on reagoinut velvoitteeseen korvata osa energiantuotantoa uusiutuvilla energialähteillä.

2.1 Ilmasto- ja energiastrategiat

Kioton sopimuksen velvoitteiden täyttämiseksi kasvihuonekaasupäästöjä on vähennettävä erittäin tuntuvasti. Teollisuusmaita velvoittavan sopimuksen toinen kausi alkoi vuoden 2013 alussa ja kestää vuoteen 2020. Toisella kaudella mukana olevien pitäisi vähentää päästöjään 18 prosenttia vuoden 1990 tasosta. Tämä voidaan saavuttaa edistämällä uusiutuvan ja kestävä kehityksen mukaisen energian tuotantoa kansallisella tasolla. Euroopan unioni on asettanut direktiivin liittyen uusiutuvan energian käytön edistämiseen EU:n alueella [4]. Direktiivin artiklassa 13 todetaan seuraavaa:

”Euroopan parlamentin, neuvoston ja komission kantojen valossa on asianmukaista asettaa pakollisiksi kansallisiksi tavoitteiksi, että Euroopan yhteisön energiankulutuksesta vuoteen 2020 mennessä on uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian osuus 20 prosenttia ja uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian osuus liikenteessä 10 prosenttia.”

Suomessa uusiutuvan energian osuus oli 27 prosenttia energian kokonaiskulutuksesta vuonna 2010 [5]. Lukuun sisältyy hyvin erilaisia energialähteitä kuten metsäteollisuuden jäteliemet, puu, biokaasu, lämpöpumput, aurinkoenergia ja niin edelleen. Suomen kansallinen pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia vuodelta 2008 käsittelee ilmasto- ja energiapoliittisia toimenpiteitä yksityiskohtaisemmin vuoteen 2020 ja yleisemmin vuoteen 2050 [6]. Suomen tavoitteeksi on asetettu mm. EU:ssa sovittujen tavoitteiden saavuttaminen sekä energian loppukulutuksen kasvun pysäyttäminen ja kääntäminen laskuun. Kyseisessä strategiassa Työ- ja elinkeinoministeriö on asettanut tavoitteeksi uusiutuvan energian osuudelle 38 prosenttia energian kokonaiskulutuksesta vuonna 2020. Strategian mukaan tuulivoimalla tuotetun energian osuutta tulisi nostaa noin 2000 MW:iin vuoteen 2020 mennessä, jolloin vuotuinen tuulisähkön tuotanto olisi noin 6 TWh. Vuoden 2011 lopussa Suomen 131:n tuulivoimalan yhteenlaskettu teho oli 199 MW, ja ne tuottivat noin 0,6 prosenttia Suomessa kulutetusta sähköstä. 28.10.2012 mennessä Suomessa oli

julkaistu alustavia tuulivoimahankkeita noin 8911 MW:n edestä, josta mantereelle suunniteltujen hankkeiden osuus on 5931 MW [7]. Strategiaa päivitetään parhaillaan, ja uusi strategia, johon on mm. yhdistetty ohjelma öljyriippuvuuden vähentämiseksi, on tarkoitus saada valmiiksi vuoden 2012 loppuun mennessä.

Keväällä 2012 valmistui Satakuntaliiton laatima Satakunnan ilmasto- ja energiastrategia, joka pohjautuu kansalliseen strategiaan [8]. Siinä strategisiksi tavoitteiksi vuoteen 2020 on asetettu muun muassa uusiutuvien energiamuotojen käytön edistäminen ja päästöjen vähentäminen. Satakunnassa merkittävimmän uusiutuvan energiantuotannon hyödyntämisen lisäpotentiaalin muodostavat puu- ja tuulienergia, ja strategiassa onkin määritelty yhdeksi painopisteeksi tuulivoiman tuotannon lisääminen maakunnassa.

Strategiassa tavoitteena on maakunnan tuulivoimatuotannon lisääminen kahteen terawattituntiin hieman yli 0,035 TWh:sta, mikä on vuoden 2008 taso [3]. Kahden TWh:n vuotuinen teoreettinen tuotantoarvio vastaa siis kolmannelta Suomen kansallisesta tavoitteesta vuodelle 2020. Maakunnallinen tuulivoimapotentiaali pyritään hyödyntämään sekä manner- että merialueilla, ja tuotanto keskitetään tuulipuistoihin. Parhaimmat tuuliolosuhteet löytyvät rannikolta, mutta myös maakunnan pohjois- ja eteläosista löytyy tuulisia alueita.

2.2 Satakunnan vaihemaakuntakaava 1 ja mannertuuliselvitys

Satakunnan ilmasto- ja energiastrategian määriteltyjen tavoitteiden pohjalta laadittiin tuulivoimarakentamista käsittelevä Satakunnan vaihemaakuntakaava 1 [2]. Vaihemaakuntakaava 1 tulee mahdollistamaan suurten tuulivoimapuistojen rakentamisen Satakunnassa. Sen vuonna 2011 valmistuneessa Mannertuulialueet Satakunnassa -esiselvityksessä määriteltiin yhteensä 19 ominaisuuksiltaan maakunnallisesti merkittävään tuulivoiman tuotantoon soveltuvaa aluetta [3]. Alueiden yhteenlaskettu pinta-ala on noin 160 neliökilometriä ja niitä on sekä lähellä rannikkoa että sisempänä mantereella. Selvityksessä on määritelty paikkatietoanalyysiä hyödyntävällä menetelmällä ne tuulivoimatuotantoon soveltuvat alueet, joilla toiminta sekä rakentamisen että tuotantojaksojen aikana aiheuttaa vähiten haittavaikutuksia esimerkiksi asutukselle sekä luonnon- ja kulttuuriympäristölle.

Mannertuuliselvityksestä puuttuu alue 20, joka tuli vasta tutkimusprojektin loppuvaiheessa mallinnettavaksi. Kaikki 20 aluetta on esitetty kuvassa 1 ja taulukossa 1 on tarkemmat tiedot alueista. Tähdellä on merkitty kaksi vaihemaakuntakaavasta poistettua aluetta. Alueen 6 poiston syynä oli sijainti liian lähellä lentokoneiden varalaskupaikkaa ja alueen 9 lähistöllä puolestaan pesii merikotkia ja kaakkureita.



Kuva 1. Parhaiten tuulivoiman hyödyntämiseen soveltuvat alueet Satakunnassa.

Taulukko 1. Vaihemaakuntakaavan 1 ehdotuksen alueet. Alueet, joista tehtiin 3D-mallit on lihavoitu. Tähdellä merkityt poistettiin kaavasta. Lähde: Satakuntaliitto.

Alue	Kunta/kunnat	Pinta-ala	Voi maloi den lkm	Napakorkeus (m) + lavan pituus (m)	Tehoar vio MW (yht.)	Teoreettinen tuotantoarvio koko alueelle/vuo si (GWh)
1	Karvia	11,3 km ²	25	140 + 60	75	237,5
2	Honkajoki	26,5 km ²	61	160 + 60	183	518,5
3	Siikainen	9,3 km ²	21	160 + 60	63	178,5
4	Merikarvia	12,3 km ²	31	160 + 60	93	331,7
5	Honkajoki	8,1 km ²	21	160 + 60	63	178,5
6 *)	Kankaanpää	4,8 km ²				
7	Siikainen	6,0 km²	12	160 + 60	36	114
8	Pori	2,9 km²	8	120 + 55	24	79,2
9 *)	Pori	6,1 km ²				
10	Pomarkku	6,6 km²	16	160 + 60	48	134,4
11	Pori, Noormarkku	6,7 km²	17	120 + 50	51	146,2
12	Pori	1,8 km²	6	130 + 60	18	72
13	Luvia	8,4 km²	20	120 + 50	60	220
14	Harjavalta, Ulvila, Nakkila	13,8 km²	34	110 + 50	102	282,2
15	Rauma, Eurajoki	6,8 km ²	15	120 + 50	45	142,5
16	Köyliö, Kokemäki	6,7 km²	13	160 + 60	39	123,5
17	Köyliö, Huittinen	16,8 km²	33	160 + 60	99	313,5
18	Huittinen	7,6 km²	19	160 + 60	57	176,7
19	Eurajoki, Luvia	7,9 km ²	18	140 + 50	54	198
20	Merikarvia	3,1 km²	10	140 + 50	30	115
				Yhteensä:	1140 MW	3,6 TWh

Taulukossa mainittu napakorkeus tarkoittaa yksittäisen voimalan korkeutta mitattuna maasta roottorin kiinnityskohtaan. Lapakorkeus on puolestaan voimalan suurin mahdollinen korkeus mitattuna maasta pystyssä olevan roottorin lavan kärkeen asti.

Vaihemaakuntakaavan 1 tuulivoimala-alueiden valinnassa oli runsaasti huomioonotettavia tekijöitä. Tuulivoimarakentamisella on vaikutuksia ympäristöön esimerkiksi maiseman muutoksen sekä tuotetun äänen ja välkkeen kautta.

Tuulivoimaloiden sijainnin valintaan vaikuttavat ensisijaisesti tuuliolosuhteet, liittynät sähköverkkoon, rakentamista ja huoltoa tukeva infrastruktuuri sekä rakenteiden perustamisolosuhteet [9]. Mannertuuli-hankkeen puitteissa tehdyssä potentiaalisten alueiden teknistaloudellisessa analyysissä huomioitiin esimerkiksi Suomen tuuliatlaksen tietojen mukaan estimoidut vuotuiset tuuliolosuhteet [10], tuotto-odotukset, etäisyys sähköverkosta, alueen pinta-ala, kulkuyhteyksien laatu ja lähellä mahdollisesti olevat suuret sähkönkuluttajat kuten kasvihuoneet.

Soveltuvuusanalyysissä otettiin huomioon karsivina tekijöinä muun muassa suurten vesistöjen ja asutuksen läheisyys. Suojaetäisyytenä tuulipuistoalueen ja asutuksen sekä virkistysalueiden välissä pidettiin yhtä kilometriä. Linnusto huomioitiin esimerkiksi siten, että suojaetäisyydeksi merikotkan pesään määrättiin kaksi kilometriä. Luonnonsuojelualueisiin tuli olla 1000 metrin etäisyys [11]. Maasto ja maaperä vaikuttivat luonnollisesti aluevalintaan. Tuulivoimaloihin vaikuttavien monenlaisten luonnonvoimien takia niiden perustusten täytyy olla vankalla pohjalla, joten peruskallion on sijaittava lähellä maanpintaa. Selvitysalueella tuli myös olla riittävästi kivennäismaata tuulivoimaloiden sijoittamista varten.

Muita huomioon otettavia seikkoja soveltuvuusanalyysissä olivat esimerkiksi alueella sijaitsevat voimalinjat, yleiskaavoitusilanne, ekologisten käytävien kuten isojen yhtenäisten metsäalueiden mahdollinen vaarantuminen sekä lentoturvallisuudesta vastaavan Finavian lentoestorajoitukset [12]. Alueiden valinnassa hyödynnettiin myös näkyvyysanalyysia, jossa ESRI:n ArcView-ohjelmalla laskettiin korkeustietojen pohjalta selvitysalueen teoreettinen näkyvyysalue.

3 AINEISTOT JA OHJELMISTOT

Tässä luvussa esitellään mallinnuksessa käytetyt tärkeimmät työkalut ja aineistot sekä niiden taustateoriaa ja -tietoja. Kappaleessa 3.1 käydään läpi maaston mallinnuksessa käytettävät digitaaliset korkeusmallit ja niiden kaksi esitystapaa. Kappaleessa 3.2 on kuvattu laserkeilaus aineiston hankintamenetelmänä, ja siinä esitellään myös keilausaineiston tallennuksessa käytetty LAS-tiedostomuoto. GIS-ohjelmistojen yleisesti käyttämä shape-tietomalli esitellään kappaleessa 3.3, ja maaston mallinnuksessa sekä kuvamateriaalin tuotannossa käytetty ohjelmisto ArcGIS kappaleessa 3.4.

3.1 Digitaaliset korkeusmallit ja niiden esitystavat

Maaston mallinnuksen perustana on maanpinnan muotoja kuvaava korkeusmalli. Tiedonkeruu voi perustua maastomittaukseen, valokuvaukseen, tutkakuvaukseen tai laserkeilaukseen, joista viimeinen on esitelty kappaleessa 3.2. Aiemmin oli varsin yleistä, että korkeusmalli laskettiin korkeuskäyristä, ja tätä tekniikkaa käytetään edelleen sellaisten korkeusmallien teossa, jotka eivät edellytä suurta tarkkuutta (10 - 200 metrin korkeusmallit). Laserkeilauksen mahdollistamaa tarkkuutta käytetään hyväksi esimerkiksi Maanmittauslaitoksen ruutukooltaan 2 m x 2 m olevan valtakunnallisen korkeusmallin tuottamisessa.

Digitaaliseksi korkeusmalliksi (Digital Elevation Model, DEM) kutsutaan maanpinnan muotojen numeerista esitystä, joka sisältää pinnanmuotoja kuvaavan korkeuspisteiden joukon. Ulottuvuuksina korkeusmallissa käytetään x-, y- ja z-koordinaatteja. DEM esittää tavallisesti paljaan maanpinnan korkeutta ilman kasvillisuutta ja rakennuksia, mutta se voi sisältää ihmisen tekemiä maarakennelmia, kuten pengerryksiä [13]. Tyypillisesti korkeusmalli tallennetaan tietojärjestelmään joko ruudukkomuodossa eli rasterina (grid) tai epäsäännöllisenä kolmioverkkona (TIN). Nämä esitellään vastaavasti kappaleissa 3.1.1 ja 3.1.2.

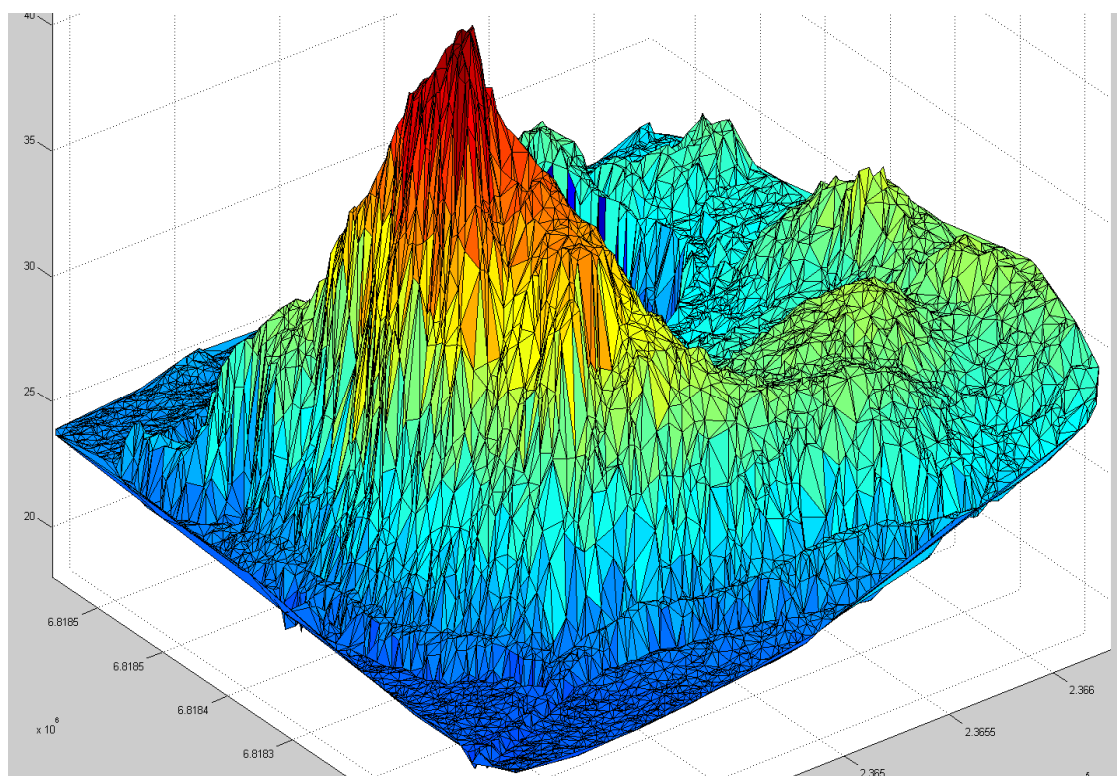
Korkeusmalleista puhuttaessa esiin nousevat myös termit maastomalli (Digital Terrain Model, DTM) ja pintamalli (Digital Surface Model, DSM). Tavallisesti maastomalli mielletään synonyymiksi korkeusmallille, mutta maastomallilla voidaan joskus myös tarkoittaa maanpintaa kuvaavaa mallia, joka voi sisältää korkeusmallin lisäksi muitakin tietoa esimerkiksi maan peitteestä kuten metsäluokituksista, maalajeista sekä rinteiden kaltevuuksista ja viettosuunnista [14]. Pintamalli taas on laserkeilauksen myötä käyttöön tullut termi, joka kuvaa maaston ylimmälle korkeustasolle asetettua pintaa.

Näin ollen pintamalli sisältää maanpinnan korkeuksia ainoastaan avomaalla, mutta muilla alueilla pinta noudattaa esimerkiksi metsän latvustoa ja rakennusten kattoja. Koska laserkeilauksessa lasersäteitä heijastuu sekä maan pinnalta että kasvustosta, siitä voidaan pisteitä luokittelemalla tuottaa sekä digitaalinen pintamalli (DSM) että maanpinnan korkeusmalli (DEM). Tuulivoimala-alueiden mallinnuksessa luotiin maanpinnan korkeusmalli ja käytettiin hyväksi kasvustosta heijastuvia pisteitä puiden sijainnin määrittelyyn.

3.1.1 TIN-malli

TIN-pintamalli koostuu kolmionmuotoisista elementeistä. Korkeusmallin pisteet on yhdistetty toisiinsa vektoreilla, jolloin muodostuu erikokoisten kolmioiden verkko (Triangulated Irregular Network, TIN). Verkon tiheys ja samalla kolmioiden koko riippuu maaston korkeusvaihteluista. Jos korkeusvaihtelu on suurta, tarvitaan pienistä kolmioista koostuva tiheä verkko. Vastaavasti alueilla, joilla korkeusvaihtelu on vähäistä, voidaan käyttää harvaa verkkoa ja suurempia kolmioita. TIN-malli sisältää korkeusmallin pisteiden ja niitä yhdistävien kolmioiden topologiset suhteet, eli mallia kuvaavaan tietorakenteeseen on talletettuna pisteiden koordinaattitietojen lisäksi esimerkiksi kolmion viettosuunta, jyrkkyys ja kunkin kolmion viereiset kolmiot.

TIN-mallin etuna seuraavassa kappaleessa selostettuun rasterimalliseen kuvaukseen verrattuna on mahdollisuus käyttää pienempää kolmiota tarkkuutta vaativissa paikoissa ja isompaa sellaisissa paikoissa, jossa maastossa ei ole suuria vaihteluita. Rasterimallissa kolmiota vastaava tietoalkio on ruutu, jonka koko on ennalta määrätty, mikä aiheuttaa toisinaan turhaa tallennustilan käyttöä. Haittapuolena TIN-mallissa on tietorakenteen luomiseen kuluva aika. Toisaalta, kun malli on kerran luotu, siitä on helppo tehdä eri tarkkuudella olevia kolmioverkkoja. Esimerkki tämän työn puitteissa mallinnettavan aluelohkon TIN-muotoisesta pintamallista on kuvassa 2.



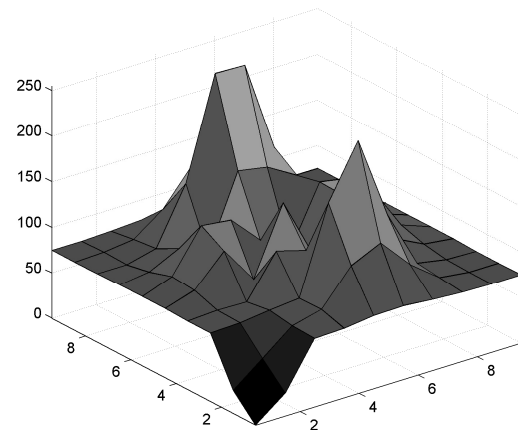
Kuva 2. Maanpinnan pisteistä muodostettu TIN. Todellisesta laserkeilausaineistosta on vähennetty pisteitä, jotta kolmiointi tulisi selvemmin esiin. Alue on Nakkilan Salomonkallio.

3.1.2 Rasterimalli

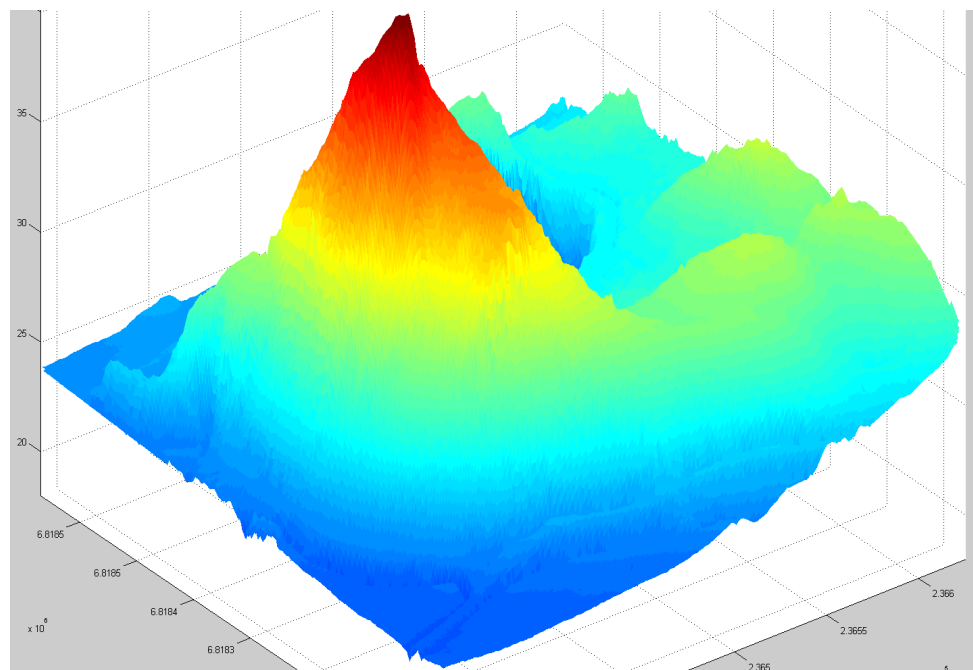
Rasteri on toinen esitystapa korkeusmallille. Siinä alue on kuvapisteistä koostuva ruudukko, jossa jokaiseen kuvapisteeseen liittyy kyseisen ruudun keskimääräinen korkeusarvo. Rasteri voidaan muodostaa eri ruutukokoja käyttäen, jolloin pienempi ruutukoko tarkoittaa tarkempaa mallia esimerkiksi maanpinnasta. Rasterimallia käytetään usein erilaisten jatkuvatyypisten pintojen esittämiseen. Esimerkkeinä tällaisista voidaan maanpinnan korkeuden lisäksi mainita lämpötilat, kasvillisuuspeite ja asukastiheys. Toisentyypeistä rasterimuotoista tietoa edustavat esimerkiksi ilmakuvat, joissa korkeuskoordinaatin tilalla on tieto kuvapisteen väristä RGB-muodossa.

Korkeusmallia kuvaava rasteri on georeferoitu pistematriisi, jossa rasterin vasemman ylänurkan koordinaattien sekä solun leveys- ja pituustiedon avulla saadaan jokaisen yksittäisen solun sijainti. Rasteri kohdistetaan karttakoordinaatistoon kulmapisteen koordinaattien sekä kuvapisteen leveys- ja pituustiedon avulla. Kuvassa 3 on yksinkertainen esimerkki tällaisesta rasterista, jossa korkeuskoordinaatiksi on otettu kunkin kuvapisteen kirkkausarvo. Esimerkki tämän työn puitteissa mallinnettavan aluelohkon rasterimuotoisesta pintamallista on kuvassa 4.

9	75	76	80	103	142	142	103	80	76
8	75	75	83	144	255	254	154	92	77
7	76	80	96	81	161	155	136	106	81
6	76	88	134	130	98	77	142	136	87
5	76	86	119	78	152	86	141	137	88
4	75	77	76	122	113	131	82	96	80
3	75	76	80	83	178	236	145	82	76
2	25	50	76	84	122	137	103	79	75
1	25	25	75	76	80	81	78	76	75
	1	2	3	4	5	6	7	8	9



Kuva 3. Korkeusmallia kuvaava rasteri ja sen 3D-esitys.



Kuva 4. Esimerkki rasterimuotoisesta pintamallista (osa alueesta 14, Salomonkallio Nakkilassa).

3.2 Laserkeilaus

Laserkeilaus on kaukokartoitusmenetelmä, joka tuottaa kolmiulotteista paikkatietoa sekä ominaisuustietoa esimerkiksi kasvillisuuden ja maaston rakenteesta sekä

maanpinnalla olevista kohteista, kuten rakennuksista. 3D-laserkeilauksen perusajatuksena on saada mittatarkkaa tietoa havaittavasta ympäristöstä itse kohdetta koskettamatta. Sen avulla voidaan tuottaa tarkkoja maasto- ja pintamalleja mitä erilaisimpia sovelluksia varten. Joitakin esimerkkejä sovelluksista käsitellään kappaleessa 3.2.4.

3.2.1 Laserkeilaustekniikka

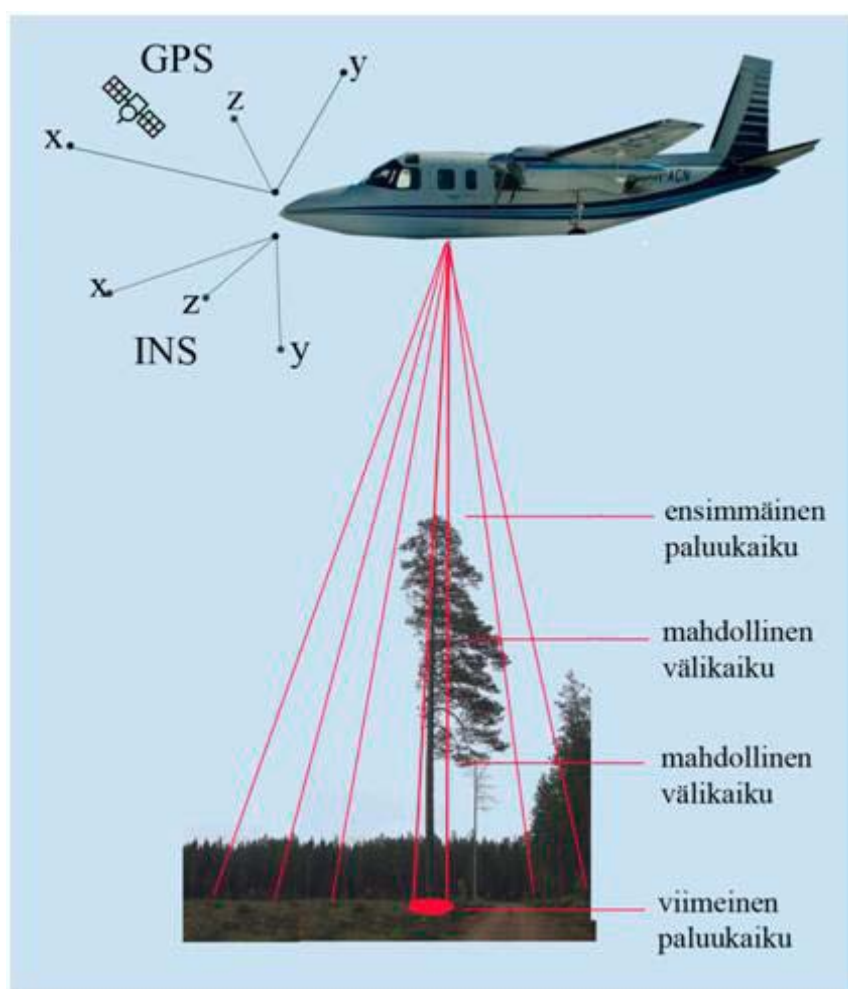
Laserkeilaus perustuu laserkeilaimen eli lidar-tutkan² käyttöön. Laserkeilain on optisella, infrapuna-alueella tai ultraviolettialueella toimiva kaukokartoituslaite, jonka lähettimenä on laser ja vastaanottimena toimii radiometrin tapainen laitteisto [15]. Tavallisesta tutkasta lidar eroaa siinä, että sen käyttämät aallonpituudet – yleensä joko 1,06 tai 10,6 μm – ovat huomattavasti tutkan käyttämiä mikroaaltoja lyhyempiä. Lidaria käytetään esimerkiksi maanmittauksessa, geologiassa, seismologiassa ja meteorologiassa. Eräänä mielenkiintoisena käyttöesimerkkinä voidaan mainita tuulen nopeuden ja suunnan mittaus. Paikallaan pysyvää tutkaa voidaan käyttää muun muassa selvittäessä tuuliolosuhteiltaan tuulipuistoille soveltuvia alueita. Toisentyypistä käyttösovellusta edustaa tässä kappaleessa käsiteltävä, lentokoneesta noin 2000 metrin korkeudesta suoritettava keilaus laajoilla alueilla.

Lidar-tutka toimii siten, että se lähettää laserpulsseja, jotka kohteeseen osuttuaan heijastuvat takaisin vastaanottimeen. Se mittaa kohteen etäisyyden lähettämällä pulssin ja mittaamalla ajan, joka kuluu heijastuneen pulssin eli paluukaiun palaamiseen. Paluukaiun kulkuaika rekisteröimällä voidaan laskea osuman saaneen kohteen sijainti, kun tiedetään keilaimen sijainti ja lentokoneen asento keilaushetkellä [16]. Tarkat paikannustiedot saadaan käyttämällä GPS-paikanninta ja lentokoneen kallistumiskulmista kertovia inertialaitteita (Inertial Measurement Unit, IMU) keilauslennon aikana. Niistä saatavien tietojen sekä laserpulssien kulkeman ajan perusteella saadaan paikannettua pulssiosuman saaneen kohteen tasosijainti ja korkeus [17]. Jokaisella yksittäistä laserpulssin kaikua kuvaavalla pisteellä on x-, y- ja z-koordinaattitieto, ja paluukaiusta tallentuu myös intensiteettiarvo eli voimakkuus. Tuloksena olevasta, useita kymmeniä tai satoja miljoonia käsittävästä kolmiulotteisesta pistejoukosta eli pistepilvestä voidaan erottaa maanpintaa edustavat laserpulssien osumat sekä muita maanpinnalla olevia kohteita, kuten taloja ja puustoa edustavia pisteitä. Juuri tätä mahdollisuutta erotella maanpinnasta ja kasvillisuudesta heijastuneet pisteet voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi kolmiulotteisten maastomallien luomisessa.

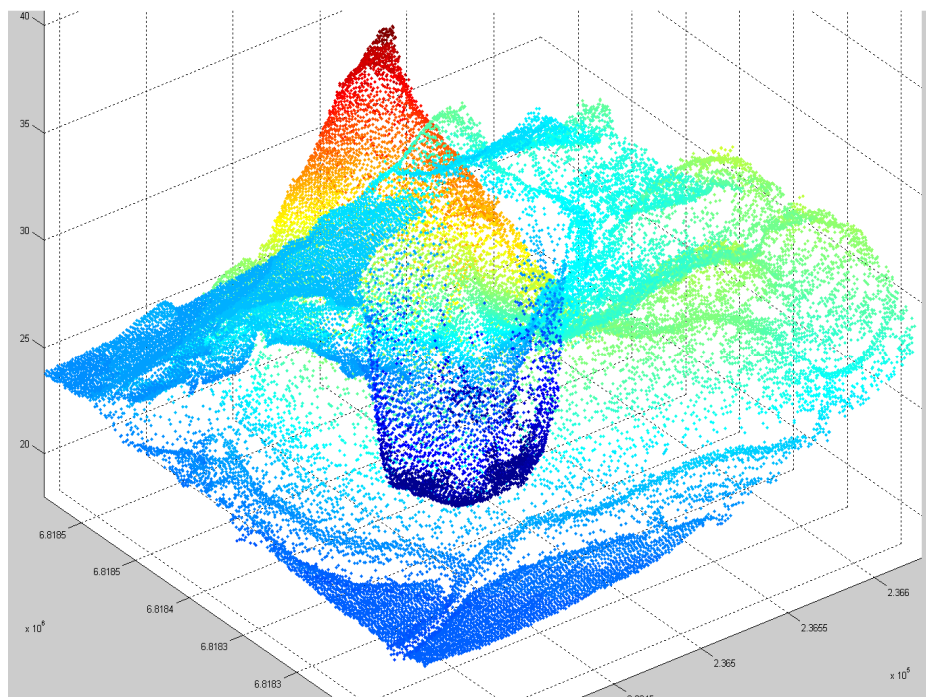
Yksittäinen laserpulssi saattaa osua useampaan kohteeseen, jolloin sensori tallentaa pulssista useamman kuin yhden paluukaiun. Näin käy esimerkiksi silloin, kun pulssi kulkee metsän lehvästön läpi maanpintaan. Ensimmäiset paluukaiut (*first pulse*) palaavat ensimmäisestä vastaantulevasta esteestä. Se voi olla esimerkiksi rakennus, tien

² LiDAR on lyhenne sanoista Light Detection and Ranging

pinta, auto, paljas maanpinta, aluskasvillisuus, puun ylempien osien lehvästö, voimalinja tai vaikkapa lintu. Laserpulssin osuessa esimerkiksi puun oksaan osa siitä heijastuu takaisin ja havaitaan ensimmäisenä kaikuna, ja osa jatkaa kulkua vaimentuneena alempiin latvuserroksiin. Mikäli jo kertaalleen kohteeseen osuneen pulssin energiahäviö ei ole ollut liian suuri tuottaakseen havaittavan kaiun, latvuserroksista voidaan saada välikaikuja (*middle pulse*). Viimeiset paluukaiut (*last pulse*) vastaavat lähestulkoon ensimmäisen pulssin kaikua, jos vastassa on kiinteä kohde. Sen sijaan läpäisevissä kohteissa, kuten kasvillisuus, viimeinen kaiku voi suotuisissa olosuhteissa läpäistä lehvistön ja antaa etäisyyshavainnon maanpinnasta. Kuvassa 5 on esitetty lentokoneesta suoritettavan laserkeilauksen periaate ja kuvassa 6 esimerkki laserkeilauksen tuottamasta pistepilvestä, joka edustaa samaa aluetta kuin kuvissa 2 ja 4.



Kuva 5. Laserkeilauksen periaate [44]. Laserpulssin osuman sijainnin määrittämiseen tarvitaan GPS- ja INS (IMU) -havainnot (INS = Inertial Navigation System, inertiapaikannusjärjestelmä).



Kuva 6. Esimerkki maanpintaa kuvaavasta pistepilvestä.

3.2.2 LAS-formaatti

Laserkeilausdataa voidaan tallentaa ASCII- eli tekstitiedostomuodossa. Tämä muoto on kuitenkin ongelmallinen, koska ASCII-muotoisen korkeusdatan lukeminen ja tulkitseminen voi olla hyvin hidasta ja tiedostokoko erittäin suuri pienilläkin aineistoilla. Laserkeilausdatan tallennuksessa yleisesti käytetty binäärinen tiedostomuoto on .las, joka myös säilyttää lidaraineistolle tyypillisen informaation toisin kuin ASCII-muotoinen tallennus. LAS on julkinen tiedostomuoto kolmiulotteisen pistepilvidatan esittämistä varten, ja standardin on kehittänyt ja sitä ylläpitää American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) [18]. Tavoitteena on ollut luoda avoin dataformaatti, jota voivat hyödyntää sekä erilaisten lidar-laitteistojen että ohjelmistotyökalujen tekijät.

Lidar-laitteistojen ohjelmistot voivat tallentaa keilausdatan las-muodossa yhdistäen GPS-, IMU- ja laserpulssiaineistoa. LAS-muodossa tieto esitetään joukkona tietuelohkoja. LAS 1.2 -formaatti sisältää binääristä, *little-endian* -tavujärjestyksessä olevaa dataa koostuen otsikko-osasta (*header block*) [19], vaihtuvanmittaisista tietueista (*variable length records*) ja varsinaisesta pisteaineistosta (*point data records*) [20]. Otsikko-osa sisältää lidartutkimuksen metadatan: muun muassa las-formaatin versionumeron, tiedoston generoineen ohjelmiston nimen, ylä- ja alarajat pisteiden koordinaateille, keilauksen ajankohdan, pistetietueiden lukumäärän, paluukaikujen määrän, pisteiden koordinaattiarvojen skaalauskerroimen ja koordinaattien poikkeamat

(*offset*). *Variable Length Records* -kenttä sisältää vaihtelevantyyppistä dataa, kuten tiedon projektiosta ja erilaista metadataa. *Point Data Record* -kenttä sisältää vähintään jokaisen pisteen x-, y- ja z-koordinaatit, intensiteetin eli paluukaiun voimakkuuden, paluukaiun järjestysnumeron, tiettyä laserpulsia vastaavien paluukaikujen määrän, pisteen luokan sekä tietoa keilauksen teknisistä yksityiskohdista kuten skannerin suuntauksesta ja lentolinjan reunoista. Lisäksi pisteestä voi olla tallennettuna GPS-aikaleima ja RGB-värikanavien arvot.

Pisteet luokitellaan ASPRS-standardin mukaisiin luokkiin [21]. Nämä on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. ASPRS-standardin mukaiset lidar-pisteiden luokat

Luokka	Luokan nimi	Suomennos
0	Created, never classified	Luokittelematon (alkutila)
1	Unclassified	Luokittelematon (luokittelu ei onnistunut)
2	Ground	Maanpinta
3	Low Vegetation	Matala kasvillisuus
4	Medium Vegetation	Keskimittainen kasvillisuus
5	High Vegetation	Korkea kasvillisuus
6	Building	Rakennus
7	Low Point (noise)	Matala virhepiste
8	Model Key-point (mass point)	Mallin avainpiste (massapiste)
9	Water	Vesi
10	Reserved for ASPRS Definition	Varattu ASPRS:n määrittelylle
11	Reserved for ASPRS Definition	Varattu ASPRS:n määrittelylle
12	Overlap Points	Lentolinjojen väliset päällekkäiset pisteet
13-31	Reserved for ASPRS Definition	Varattu ASPRS:n määrittelylle

3.2.3 Laserkeilausaineiston luokittelu Maanmittauslaitoksella

Suomessa muun muassa Maanmittauslaitos tuottaa laserkeilausaineistoja [22]. Tässä kappaleessa on esitelty pääpiirteissään prosessi, jolla Maanmittauslaitos luokittelee laserkeilausdatansa. Luokittelu tehdään aluksi automaattisesti, ja tarvittaessa luokittelua tarkennetaan manuaalisena työnä stereotyöasemien avulla.

Automaattinen luokittelu

Pistepilven pisteet voidaan luokitella automaattisesti eri luokkiin. Automaattisessa maanpintaluokittelussa, joka perustuu tietoon paluukaikujen järjestysluvuista, aineistosta erotellaan mm. maanpintaa ja kasvillisuutta edustavat laserpulssien osumat. Paluukaiun järjestysnumero kertoo, kuinka mones takaisinheijastus on kyseessä. Kuten kappaleessa 3.1 on selostettu, esimerkiksi rakennuksista ja maasta tulee vain yksi paluukaiku, mutta kasvillisuudesta useita. Paluukaiun järjestysnumeron perusteella pystytään siis luokittelemaan, minkälaisista kohteista pulssit ovat heijastuneet takaisin.

Lähtötilanteessa kaikki pisteet ovat luokassa 1 (*unclassified*) [23]. Luokittelun lopputilanteessa luokassa 1 ovat ne pisteet, joiden luokka ei luokitusprosessissa muuttunut. Luokittelualgoritmi erottelee ensin viimeisen paluukaiun laserpisteet omaan luokkaansa, ja muut paluukaikupisteet matalan kasvillisuuden tai muuhun luokkaan. Sen jälkeen viimeisen paluukaiun pisteistä aletaan etsiä maanpintaa edustavia luokan 2 (*ground*) pisteitä pistepilven paikallisten korkeusminimikohtien ympärille. Nämä luokkaan 2 sijoitettavat pisteet edustavat alinta pintaa, joka ilmasta käsin on havaittavissa. Karkeiksi virheiksi tulkittavat eli esimerkiksi maanpinnan alapuolella olevat pisteet poistetaan. Käytettävistä luokitteluparametreista riippuu, miten jyrkkiä maaston muutoksia malliin hyväksytään. Parametrit pyritään valitsemaan siten, että maanpinta saadaan luokiteltua mahdollisimman kattavasti ilman siihen kuulumattomia kohteita, kuten rakennuksia ja puustoa.

Osa virhepisteistä jää jäljelle. Näitä ovat luokan 7 matalat virhepisteet (*low point*), jotka johtuvat tyypillisesti esimerkiksi voimakkaasta häikäisystä, kirkkaasta kohteesta tai laserpulssin monitehoheijastuksesta. Myös korkealla ilmassa voi olla pisteitä erilaisista paluukaikuja antaneista kohteista. Osa tällaisista pisteistä on jo aikaisemmassa vaiheessa poistettu aineistosta, mutta ne, joita ei ole poistettu, sijoittuvat luokkaan 1, 13 tai 3. Luokkaan 13 päätyvät pisteet lentolinjojen päällekkäisiltä alueilta siten, että vain yhden linjan pisteitä on mukana mahdollisessa stereomallin avulla tehtävässä jatkoluokittelussa, ja muiden linjojen samat pisteet jätetään tähän luokkaan. Jatkoluokittelusta kerrotaan jäljempänä hieman lisää.

Luokan 3 (*low vegetation*) pisteet vastaavat paluukaikuja, jotka ovat tulleet jostakin laserpulssin osittain läpi tai ohi päästäneestä kohteesta – käytännössä valtaosa kaiuista on peräisin kasvillisuudesta. Se on yleisluokka niille pisteille, jotka eivät vastaa laserpulssien ainoita tai viimeisiä paluukaikuja. Näiden pisteiden luokka ei muutu mahdollisessa jatkoluokittelussa.

Jatkoluokittelu

Automaattisesti luokiteltua dataa voidaan vielä käsitellä niin, että pisteiden luokat muuttuvat. Automaattisen maanpintaluokittelun tarkastus ja jatkoluokittelu suoritetaan

pääosin maanmittaustoimistoissa ilmakuvastereomallien ja graafisen ESPA-työympäristön avulla [24]. Digitaalinen stereotyöasema mahdollistaa maastotietojen kolmiulotteisen tarkastelun ilmakuvista lasketun numeerisen stereomallin päällä.

Ortoilmakuvista muodostetaan stereomalli ottamalla lentolinjalta kaksi peräkkäistä kuvaa, jotta näiden kuvien yhteistä aluetta eli stereopeittoa voidaan katsella stereokuvana. Kuvaparia tarkastellaan tietokoneen näytöllä aktiivisin polarisaatiosilmälasein, jonka okulaarien sulkimet tahdistetaan samaan rytmiin – oikean ja vasemman puoleinen kuva vuorottelevat näytöllä tavallisesti noin 50 kertaa sekunnissa. Stereomalli syntyy digitaalisista ortokuvista mikrotietokoneen kuvaruudulle, jota kartoittaja katsoo polarisaatiolasit silmillään. Kuvan päälle tulostuu myös karttapiirros, jolloin kartoittajan on helppo verrata kuvaa ja tietokannassa olevia tietoja sekä päivittää muuttuneet tiedot.

Esimerkiksi erilaiset vesistöt luokitellaan omiin pisteluokkiinsa tällä tavoin, koska vedestä palautuu laserkeilauksessa laserpulsseja vain satunnaisesti, ja nekin voivat olla epäluotettavia. Toisin kuin automaattisessa luokittelussa, aineistosta ei poisteta pisteitä – vain luokka voi muuttua. Jatkoluokittelussa korjataan esimerkiksi havaitut merkittävät automaattisen maanpintaluokittelun virheet: maanpintaan kuulumattomia tai maanpinnasta puuttuvia kohteita luokitellaan uudestaan siten, että pisteen luokitusta vaihdetaan luokasta 2 luokkaan 1 tai päinvastoin.

3.2.4 Laserkeilausaineiston käyttö

Laserkeilausaineiston avulla Maanmittauslaitos tuottaa tarkan valtakunnallisen 2 m x 2 m -korkeusmallin, jota hyödynnetään esimerkiksi korkeuskäyrien luomisessa. Korkeusmallia hyödynnetään monissa kartoitus- ja kaavoitustehtävissä sekä rakennetun ympäristön suunnittelutöissä. Lidar-aineistosta tuotettavia malleja käytetään erilaisissa reittien optimointi- ja tiedonkeruusovelluksissa sekä melua mallintavissa ja maanpinnan muotoja tutkivissa sovelluksissa. Korkeusmallin avulla voidaan simuloida esimerkiksi kuuluvuus-, kattavuus- ja näkyvyysalueita, ja sitä voidaan käyttää myös leikkaus- ja täyttömaiden massalaskentaan tai kaltevuuksien, jyrkkyyden tai profiilien laskentaan.

Laserkeilausaineistoja ja siitä tuotettua korkeusmallia voidaan hyödyntää monissa ympäristön suojeluun ja poikkeusolosuhteisiin, kuten kaatosateisiin ja peltojen pintavaluntaan liittyvissä ennakoivissa toimissa ja suunnittelussa. Tärkeä sovellusalue on tulvavaara-alueiden simulointi. Esimerkiksi Maanmittauslaitoksen keilaukset on kohdistettu aluksi tulvaherkille alueille, joilta EU:n tulvadirektiivi edellyttää luotettavia tulvakarttoja vuoteen 2013 mennessä. Aineistoa on tuotettu myös lentokenttien läheisyydestä, mistä kansainvälinen ilmailujärjestö ICAO (International Civil Aviation Organization) vaatii tarkat maastomallit. Korkearesoluutioinen korkeusmalli kiinnostaa lisäksi arkeologeja ja on hyödyllinen monissa geologian sovelluksissa, koska

maanpinnasta voidaan sen myötä havaita yhä pienempiä yksityiskohtia. Tarkemman korkeusmallin avulla voidaan myös laskea yhä tarkempia ortoilmakuvia.

Suomessa Metsäkeskus suorittaa laserkeilauksia osana metsien inventointia. Vuosittain inventoidaan laserkeilauksen avulla yhteensä noin 1,5 miljoonaa hehtaaria yksityismetsiä [25]. Yksityismetsien laserkeilaus alkoi Suomessa vuonna 2008 [26]. Metsävaratiedon keruujärjestelmä perustuu laserkeilaukseen, ilmakuvaukseen, maastokoealamittauksiin sekä näiden aineistojen perusteella tehtävään puustotulkintaan. Laserkeilaus tuottaa tiedon alueiden puiden sijainnista ja korkeudesta, ja ilmakehuksen omanlaisensa sävyarvot erityyppiselle puustolle [27]. Koealoilla puolestaan mitataan tarkasti puusto maastossa paikan päällä, ja tieto yleistetään koskemaan kaikkia alueen samansävyisiä metsiä. Puista mitataan keskikorkeus, keskiläpimitta ja kappalemäärä, jolloin saadaan laskettua koealan puuston tilavuus puulajeittain. Lukujen perusteella vastaavat tiedot lasketaan laserkeilaus- ja ilmakehu-aineistoista koko inventointialueen metsikkökuvioille³.

3.3 Shape-tietomalli

Shape-tiedosto (*shapefile*) on digitaalinen vektorimuotoisen datan tallennusformaatti [28]. Sitä käytetään geometrisen paikkatiedon ja siihen liittyvien ominaisuustietojen tallentamiseen. Tiedostomuotoa ei voi käyttää topologisen informaation tallentamiseen, eli paikkatietokohteiden tai niiden osien välisiä sijaintisuhteita ei voi tallentaa shape-tiedostoon. Formaatin on kehittänyt ja sitä sääntelee Environmental Systems Research Institute (ESRI), joka esitteli tiedostomuodon 1990-luvulla ArcView GIS-ohjelmiston version 2 yhteydessä.

Shape-tiedostolla ei tarkalleen ottaen yleensä tarkoiteta yksittäistä tiedostoa vaan tietokantaa, joka koostuu vähintään kolmesta tiedostosta. Pää-tiedosto, jolla on .shp-pääte, pitää sisällään alkeellisten geometrinen datatyypin avulla kuvatut karttakohteet (*feature*). Karttakohde kuvaa reaali maailman objektia, kuten tietä, jokea, rakennusta, hallinnollista aluetta tai vaikkapa puuta. Se on kuvattu vektoridatana, joka voi olla joko pisteitä, viivoja tai polygoneja eli monikulmioita. Yhdessä pää-tiedostossa voi olla vain yhdentyyppistä vektoridataa. Viiva on tarkemmin määriteltynä moniviiva (*polyline*), joka koostuu useasta osaviivasta. Se tarkoittaa järjestettyä joukkoa pisteitä eli solmuja (*vertex*), ja koostuu yhdestä tai useammasta osasta. Osa (*part*) on kahden tai useamman toisiinsa yhdistetyn pisteen jono. Osat voivat olla yhdistettynä toisiinsa, ja ne voivat myös leikata toisiaan.

³ Metsikkökuvioiksi kutsutaan subjektiivisesti rajattua yhtenäistä metsäaluetta, jossa puuston ja kasvupaikan ominaisuudet sekä metsänhoidollinen toimenpidetarve ovat yhtenäiset [25].

Monikulmio eli polygoni (*polygon*) puolestaan kuvaa aluetta. Se koostuu yhdestä tai useammasta renkaasta (*ring*). Rengas koostuu neljästä⁴ tai useammasta toisiinsa yhdistetystä pisteestä eli solmusta, jotka muodostavat suljetun alueen. Monikulmion sivut eivät saa leikata toisiaan. Kuvassa 7 on esimerkki monikulmioista: alueet kuvaavat voimalinjojen johtokäytäviä.

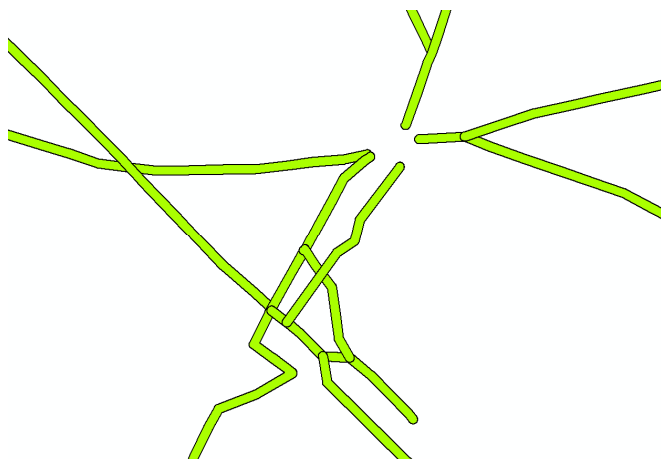
Päätiedostossa jokainen tietue kuvaa yksittäistä karttakohdetta. Jos kohde on yksittäinen piste, siihen liittyy vain yksi koordinaattipari tai -kolmikko riippuen siitä, onko kyseessä kaksi- vai kolmiulotteinen data. Jos kohde on moniviiva tai monikulmio, tietue sisältää listan sen osaviivojen päätepisteiden tai vastaavasti kulmapisteiden koordinaateista.

Shx-päätteiseen indeksitiedostoon puolestaan tallennetaan tieto siitä, missä kohdassa päätiedostoa mikäkin tietue sijaitsee, sekä tieto sen pituudesta. Indeksitiedosto mahdollistaa päätiedoston lukemisen. Lisäksi tietuetaulukko, joka on muodoltaan dBase-taulu (.dbf), on tallennettu jokaiseen tietueeseen liittyvä ominaisuustieto. Yksinkertaisin mahdollinen shape-tiedosto sisältää x- ja y-koordinaatit sekä tiedon siitä, onko kyseessä piste, viiva vai monikulmio.

Esimerkiksi ArcGIS-ohjelmisto, josta on kerrottu enemmän kappaleessa 3.4, hyödyntää shape-tiedostoja. Kuvassa 8 on ArcMap-sovelluksen esitys ominaisuustaulusta (*attribute table*), jossa on erästä tieverkostoa kuvaavia moniviivoja. Itse moniviivat on esitetty kuvassa 9. Viivat sisältävän shp-päätiedoston tietoihin on yhdistetty vastaavasta dbf-tiedostosta ominaisuustieto, joka tässä tapauksessa on viivan pituus metreinä.

Lisäksi shape-tietokanta voi sisältää useita muita vapaavalintaisia tiedostoja, joita ESRI on listannut yhteensä 12 kappaletta. Yksi tärkeimmistä valinnaisista tiedostoista on tekstimuotoinen projektitiedosto (.prj), johon on tallennettu tieto aineiston koordinaattijärjestelmästä ja projektista. Sbn-, sbx-, ain-, aix-, fbn- ja fbx- tiedostot puolestaan nopeuttavat analyysien ja kyselyiden suorittamista, ja aineiston metatiedot voidaan tallentaa xml-tiedostoon. Tietokannan kaikkien tiedostojen on oltava samannimisiä ja samassa hakemistossa.

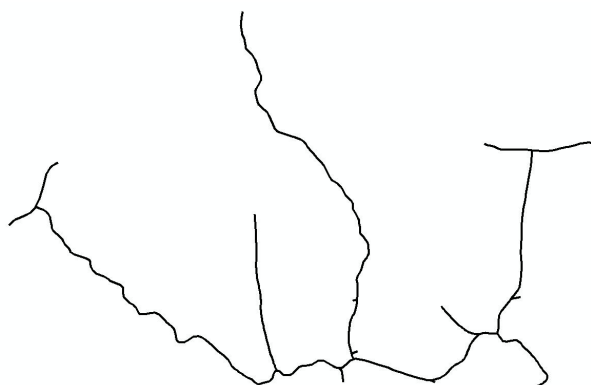
⁴ Periaatteessa kolme pistettä riittäisi renkaan määrittelyyn. Neljä pistettä tarvitaan, koska alku- ja loppupisteet on määriteltävä erikseen [28].



Kuva 7. Esimerkki voimalinjoja kuvaavista monikulmioista.

	FID	Shape *	OBJECTID	SHAPE Leng
▶	0	Polyline	1	551,277223
	1	Polyline	2	5430,299723
	2	Polyline	3	402,343894
	3	Polyline	4	2245,746552
	4	Polyline	5	1033,81661
	5	Polyline	6	104,645521
	6	Polyline	8	7,82048
	7	Polyline	9	391,064958
	8	Polyline	10	10,1999
	9	Polyline	11	463,898101
	10	Polyline	12	105,594335
	11	Polyline	13	317,151791
	12	Polyline	14	31,194626
	13	Polyline	15	67,952425
	14	Polyline	16	10,563878
	15	Polyline	17	28,945335
	16	Polyline	18	42,184135

Kuva 8. Esimerkki shape-tiedoston ominaisuustietotaulun tietosisällöstä.



Kuva 9. Esimerkki tieverkostoa kuvaavasta moniviivasta.

3.4 ArcGIS-ohjelmisto

ESRI Inc. on yhdysvaltalainen vuonna 1969 perustettu paikkatietoratkaisuiden toimittaja [29]. ESRI:n tuotteisiin kuuluu muun muassa ArcGIS-tuoteperhe. Se on eri muodoissaan ollut eräs tärkeimmistä paikkatieto-ohjelmistoista maailmassa aina 1980-luvun alusta lähtien. Suomessa esimerkiksi Tiehallinto, Geologian tutkimuskeskus, Suomen ympäristökeskus, Puolustusvoimat, useat oppilaitokset, kunnat, metsäalan organisaatiot sekä kaupan alan yritykset hyödyntävät ESRI:n paikkatieto-ohjelmistoja toiminnassaan.

ArcGIS for Desktop -työasemaohjelmistot mahdollistavat paikkatietoaineistojen monipuolisen keräämisen, analysoinnin, hallinnan, jakamisen ja julkaisemisen. Ohjelmiston lisenssejä on olemassa monta eri tasoa, joista tässä käsitellään vain kattavinta Advanced-tason lisenssiä. Se tarjoaa valmiuksia paikkatiedon analysointiin ja mallintamiseen, tietojen konvertointiin ja julkaisemiseen useassa eri tiedostomuodossa, yhden ja useamman käyttäjän paikkatietokantojen kehittämiseen sekä karttojen luomiseen kartografiatyökalujen avulla.

ArcGIS for Desktop koostuu useasta erillisestä sovelluksesta. ArcCatalog on tiedonhallintasovellus, jota käytetään tiedostojen ja tietokantojen käsittelyyn. Sillä voi myös katsella ja hallinnoida spatiaalisen aineiston metatietoa ja esikatsella dataa kartalla. ArcMap on ArcGIS -ohjelmistoperheen keskeinen peruskomponentti. Se sopii kaksiulotteisen datan esittämiseen. ArcMap-sovelluksessa voi katsella, luoda, editoida ja hakea tietokannoista geospaatialista dataa ja liittää siihen symboleita sekä tehdä karttoja ja karttoihin perustuvaa analyysiä.

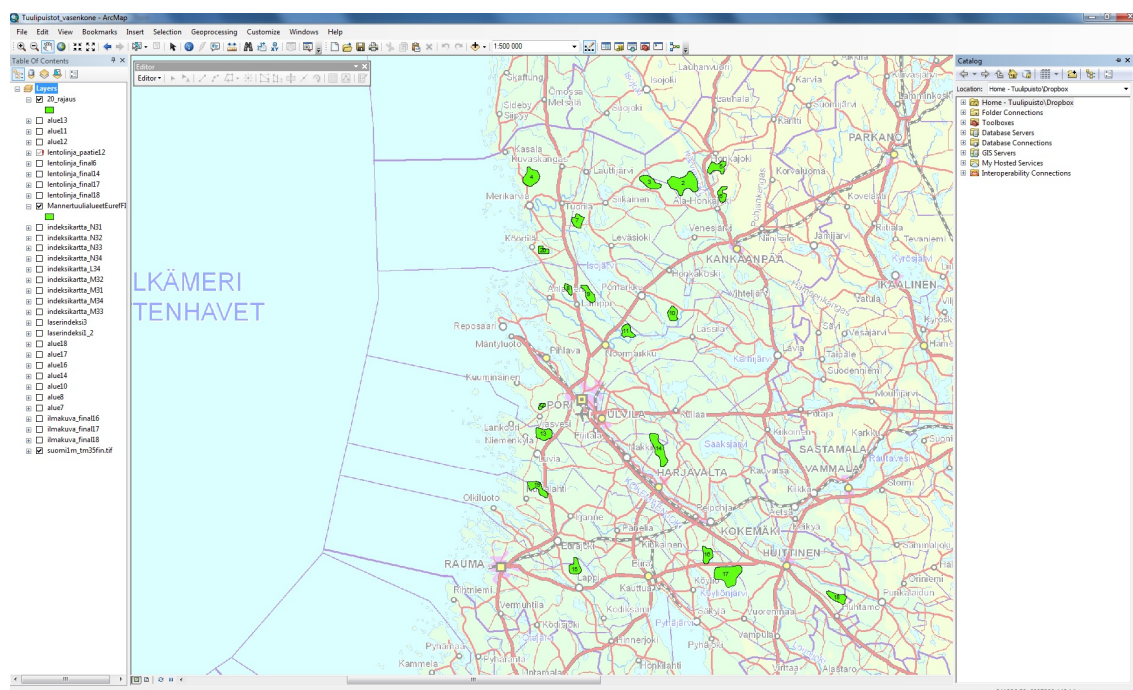
Lisenssiin sisältyy useita erilaisia laajennusosia (*extension*), joita voi hankkia erikseen myös alemman tason lisensseihin. Kyseiset erikoistyökalut mahdollistavat tiettyjen tehtävien suorittamisen, kuten esimerkiksi rasteriaineiston käsittelyn tai kolmiulotteisen analyysin. Varsinainen 3D-visualisointi ja kolmiulotteisen tiedon analysointi voidaan tehdä ArcScene- tai ArcGlobe -ohjelmien avulla. ArcGlobe ja ArcScene kuuluvat 3D Analyst -laajennusosaan. 3D Analyst -laajennus sisältää työkaluja visualisointiin, analyysiin ja pintojen luomiseen. Suuria aineistoja voi tutkia kolmiulotteisesti eri näkökulmista. ArcGlobe mahdollistaa laajojen paikkatietoaineistojen esittämisen maapallon mittakaavassa, kun taas ArcScene sopii pienempien alueiden kolmiulotteiseen visualisointiin.

ArcMap käyttää karttadokumenttina mxd-tiedostoa, johon voidaan tallentaa kaksiulotteinen aineistonäkymä kaikkine yksityiskohtineen. Kuvassa 10 on esimerkki tällaisesta näkymästä. ArcScene-sovelluksessa vastaava dokumentti on .sxd-päätteinen. Se sisältää datan hakemistopolut, 3D-näkymän ominaisuudet ja itse datan kerroksina (*layer*). Kerros on tapa esittää jokin yksittäinen maantieteellinen tietokokonaisuus ArcMap- ja ArcScene -sovelluksissa. Se voi kuvata millaista dataa tahansa –

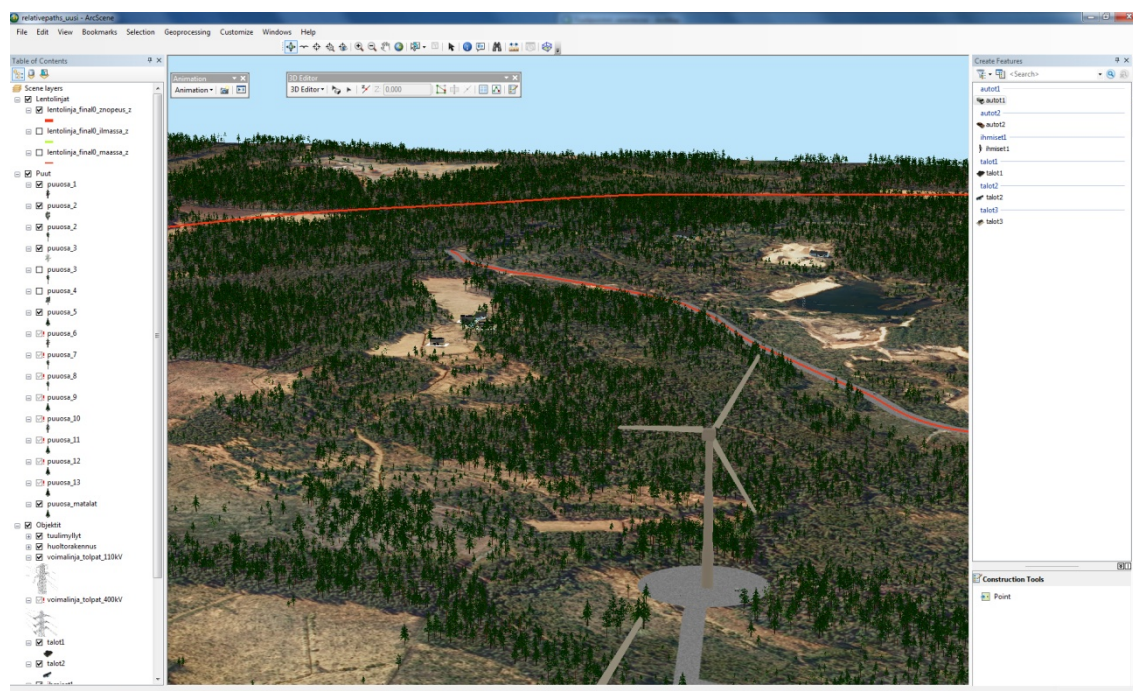
esimerkiksi karttaa, jokea tai järveä, vuoristoa, tietä, hallinnollista rajaa, voimalinjaa, ortoilmakuvaa tai vaikkapa ryhmää rakennuksia.

ArcScenen 3D-näkymä rakennetaan kerroksista. Karttakohteet ovat kerroksia, ja ne voidaan sijoittaa näkymään oikealle korkeudelle monella eri tavalla. Ne voidaan määritellä myötäilemään tiettyä 3D-pintaa, kuten maanpintaa, joka voi olla esimerkiksi rasterimuodossa oleva kerros. Korkeussijaintitieto voidaan ottaa karttakohteen ominaisuuksissa määritellystä korkeustiedon sisältävästä kentästä, tai käyttää vakiokorkeutta.

Paikkatietoja voidaan visualisoida 3D-objektien avulla kolmiulotteisen maanpinnan päällä. Kuhunkin karttakohteeseen voidaan liittää symboli, esimerkiksi taloa tai puuta kuvaavan pisteen paikalle juuri tietynlainen 3D-objekti. ArcScenen avulla tuotettua 3D-mallia voidaan havainnollistaa animaatioiden avulla. Tätä varten ArcScenessä on Animation Manager -työkalu. Animaatiot muodostetaan tekemällä viivamuodossa olevia kameralinjoja, joita kamera seuraa. Kuvassa 11 on avattu sxd-dokumentti ArcScene-sovelluksessa. Kuvassa vasemmalla näkyvät kerrokset, joita tässä tapauksessa ovat erilaiset maisemaan sijoitetut kolmiulotteiset objektit kuten tuulivoimalat ja puut. Maapohjana on ilmakuva, joka on määritelty myötäilemään maaston korkeutta. Kameran seuraama linja näkyy kuvassa punaisena viivana.



Kuva 10. Näkymä ArcMap-sovelluksesta. Vasemmalla sisällysluettelossa näkyvät eri kerrokset. Ne voidaan merkitä joko näkyviksi tai näkymättömiksi. Kuvassa näkyvinä ovat vain TIFF-kuvana oleva kartta ja vihreinä näkyvät alueet, jotka on tallennettu shape-tiedostoihin.



Kuva 11. Näkymä ArcScene-sovelluksesta.

4 TUULIVOIMALA-ALUEIDEN MALLINNUS

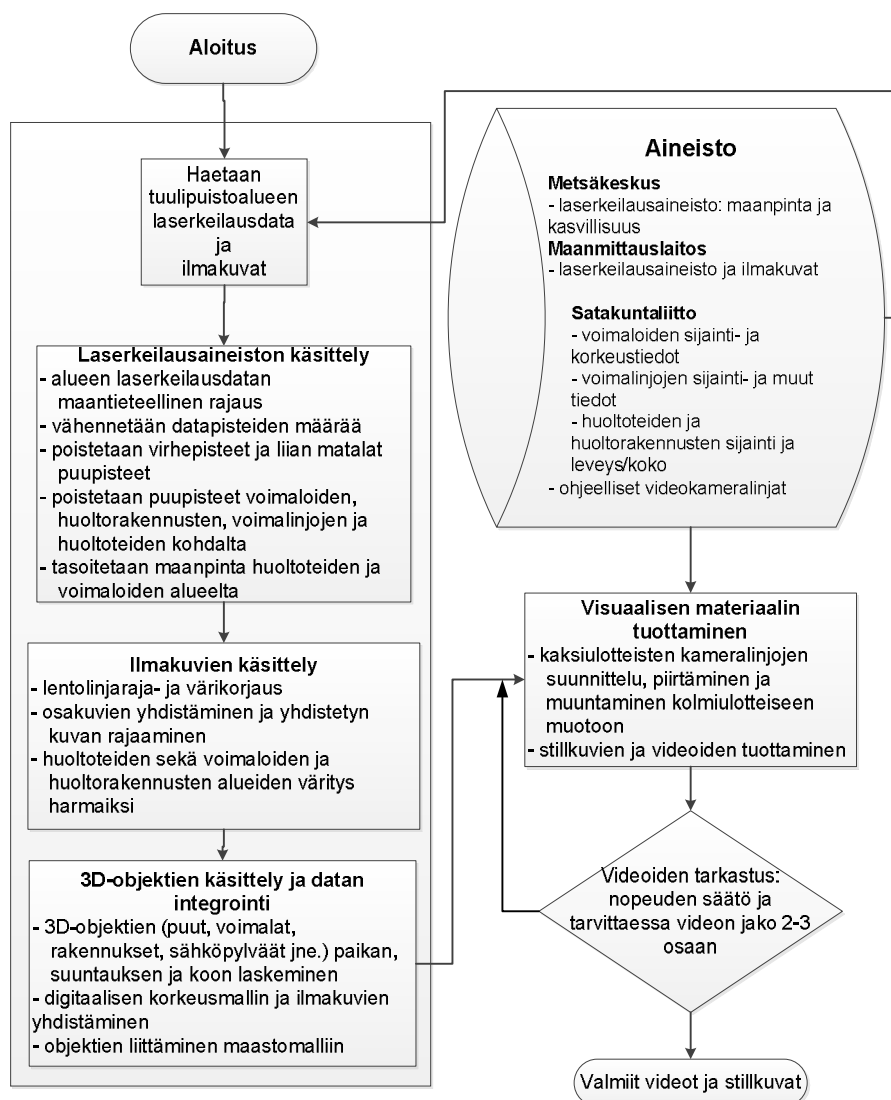
Kaaviossa 1 on esitetty koko kolmiulotteisen havainnollistamismateriaalin tuotantoprosessi. Lähdeaineistona käytettiin valmiiksi luokiteltua laserkeilausaineistoa, ilmakuvia, erilaisten malliin liitettävien kolmiulotteisten objektien sijainti- ja korkeustietoa sekä Satakuntaliitolta saatuja videokameralinjojen luonnoksia.

Mahdollisimman realistisen havainnollistamismateriaalin tuottamiseksi päädyttiin ratkaisuun, jossa rakennettiin digitaalinen pintamalli yhdistämällä laserkeilaus- ja ilmakuva-aineisto. Kappaleessa 4.2 on selostettu tarkemmin maaston mallinnuksen ja kappaleessa 3.1 korkeusmallien teoreettisia perusteita. Todelliset (puut, asuintalot ja voimalinjat) ja suunnitellut (voimalat, huoltorakennukset, huoltotiet ja uudet voimalinjat) objektit korvattiin luodussa mallissa tietokonegrafiikalla. Malleihin lisättiin myös kolmiulotteisia symboleja kuten autoja ja ihmisiä mittakaavan havainnollistamiseksi.

Puiden paikka ja koko määriteltiin analysoimalla kasvillisuudeksi luokiteltua laserkeilausaineistoa. Useimmat tuotantoprosessin vaiheet pystyttiin automatisoimaan MATLAB- ja Python -ohjelmoinnin avulla. Automaattisen prosessoinnin jäljiltä jouduttiin tarkistamaan ja määrittelemään uudelleen joitakin kolmiulotteisten objektien ominaisuuksia, kuten esimerkiksi autojen sijainti ja suuntaus. Samoin videokameralinjojen piirtäminen digitaaliseen muotoon luonnosten perusteella oli käsin tehtävä työvaihe.

Aineistoa käsiteltiin ensisijaisesti MATLAB-ohjelmiston avulla. Mikäli tekstissä ei ole erikseen mainittu muuta ohjelmaa tai ohjelmistoa, oletetaan datan käsittelyn tapahtuneen MATLAB:illa. Laskenta suoritettiin kahdella tietokoneella: toisessa oli 8 GB:n keskusmuistikapasiteetti, suorittimena 3.40 GHz Intel® Core™ i7-2600 ja näytönohjaimena NVIDIA Quadro 2000D 5 GB:n muistilla. Toisessa koneessa keskusmuistia oli 10 GB, suorittimena 2.5 GHz Intel® Xeon® E5420 ja näytönohjaimena NVIDIA Quadro 1700 5 GB:n muistilla. Jälkimmäisen koneen näytönohjainkapasiteetti ei ollut riittävä isoimpien alueiden käsittelyyn, joten sillä laskettiin valikoiden pienimpiä alueita.

Kaavio 1. 3D-mallin tuotantoprosessi



4.1 Mallinnuksessa käytetyt aineistot ja työkalut

Kolmiulotteiset mallit ja kuvamateriaali luotiin pääasiassa MATLAB- ja ArcGIS -ohjelmistojen avulla käyttäen lähdeaineistona laserkeilaus- ja ortoilmakuvadataa sekä Satakuntaliiton toimittamia aineistoja. Alla olevassa taulukossa 3 on esitetty käytetty aineisto alueittain.

Taulukko 3. Laserkeilausdatan ja ilmakuvien lähteet alueittain

Alue	Nimi	Laserkeilausaineiston lähde	Ilmakuva
7	Kurkikeidas	MML 2008-2010, stereomallin avulla luokiteltu	MML 2012
8	Pahamäki	Metsäkeskus 2010	MML 2012
10	Harjakoski	Metsäkeskus 2010	MML 2012
11	Torpankorpi	Metsäkeskus 2010	MML 2012
12	Jakkuvärkki	MML 2008-2010, automaattisesti luokiteltu	MML 2012
13	Oosinselkä	MML 2008-2010, automaattisesti luokiteltu	MML 2012
14	Linnunmäki	MML 2008-2010, stereomallin avulla luokiteltu	MML 2010
16	Maanlevonkangas	Metsäkeskus 2010	MML 2010
17	Korpilevonmäki	Metsäkeskus 2010	MML 2010
18	Huhtamo	Metsäkeskus 2010	MML 2010/2011
20	Köörtilä	MML 2008-2010, stereomallin avulla luokiteltu	MML 2012

4.1.1 Laserkeilausaineisto

Laserkeilauksen käyttö metsien inventoinnissa on kehittynyt viime vuosina nopeasti. Tässäkin tutkimusprojektissa käytettiin Metsäkeskuksen aineistoa siltä osin kuin sitä oli saatavilla. Mallinnuksessa hyödynnettiin lopulta kolmenlaista laserkeilausaineistoa: Metsäkeskuksen vuoden 2010 laserkeilausdataa ja Maanmittauslaitoksen vuosien 2008-2010 sekä automaattisesti että stereomallin avulla luokiteltua dataa. Valinnat tehtiin saatavuuden ja käyttötarkoitukseen soveltuvuuden perusteella. Lähtökohtaisesti käytettiin Metsäkeskuksen laserkeilausdataa. Jos sitä ei ollut saatavilla jollekin alueelle, käytettiin Maanmittauslaitoksen aineistoa. Sekä Metsäkeskuksen että Maanmittauslaitoksen aineistot olivat .las-muodossa [30]. Yksi .las -tiedosto sisältää laserkeilausdatan TM35-lehtijaon mukaiselta 3 x 3 kilometrin alueelta ja koostuu keskimäärin 10 miljoonasta pisteestä. Koordinaatistona aineistoissa on ETRS-TM35FIN ja korkeusjärjestelmänä N2000.

Maanmittauslaitoksen aineisto

Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineisto oli LAS 1.0 -formaattissa [31]. Osa saatavilla olevasta aineistosta oli Maanmittauslaitoksen toimesta luokiteltu eri pisteluokkiin pelkästään automaattisesti, ja osa oli vielä jatkolokiteltu ilmakuvien avulla. Luokittelusta on kerrottu enemmän kappaleessa 3.2.3. Stereomallin avulla luokiteltu aineisto haettiin Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen tiedostopalvelusta [32] ja automaattisesti luokiteltu aineisto PaITuli-paikkatietopalvelusta [33]. Aineistoa ei ole saatavilla kattavasti koko maan alueelta, mikä aiheutti omalta osaltaan rajoituksia mallinnettavien tuulivoimala-alueiden suhteen. Puuston mallinnuksessa käytettiin

luokkaa 3 (matala kasvillisuus, *low vegetation*), ja maanpinnan mallinnuksessa luokkaa 2 (*ground*).

Laserkeilausaineisto on Maanmittauslaitoksen tarkin korkeustietoaineisto. Aineiston pistetiheydeksi maanpinnalla on määritelty vähintään 0.5 pistettä neliömetrillä. Käytetyissä datoissa pistetiheys oli noin 0.8 pistettä neliömetrillä. Pisteiden tasotarkkuuden keskivirhe on enintään 60 cm ja korkeustarkkuuden keskivirhe enintään 15 cm yksiselitteisillä kohteilla.

Metsäkeskuksen aineisto

Metsäkeskuksen aineisto oli LAS 1.2 -formaattissa [34]. Tosin Metsäkeskuksen luokituksessa luokka 9 vastasi lentolinjojen välisiä päällekkäisiä pisteitä (*overlap*) eikä vettä, kuten ASPRS-standardissa [20]. Pisteaineistosta oli luokiteltu kasvillisuuden lisäksi maanpinnan pisteet sekä aineiston virhepisteet. Puuston mallinnuksessa käytettiin luokkaa 5 (korkea kasvillisuus, *high vegetation*) ja maanpinnan mallinnuksessa luokkia 2 (maanpinta, *ground*), 8 (maanpinnan merkitsevät pisteet, *Model Key-point (mass point)*) ja 9. Luokka 8 edustaa pienintä määrää pisteitä, joka tarvitaan maanpinnan muodostukseen, ja on itse asiassa luokan 2 osajoukko. Aineiston käyttöä vaikeutti se, että luokissa 2 ja 5 ei ollut pisteitä lentolinjojen päällekkäisillä alueilla. Nämä puuttuvat pisteet oli haettava luokasta 9.

4.1.2 Ortoilmakuvat

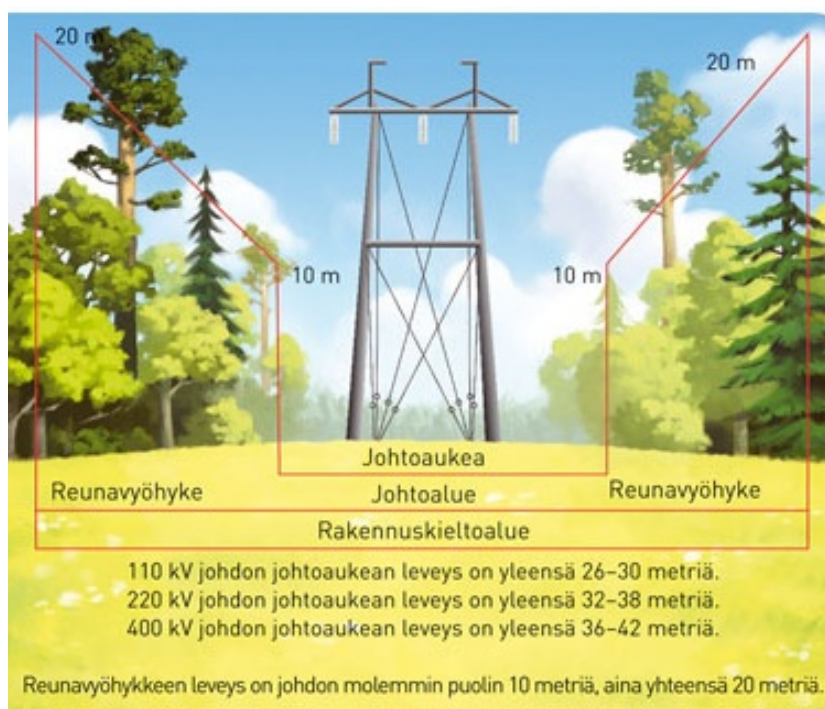
Kolmiulotteisissa malleissa käytettiin maanpintana Maanmittauslaitoksen värillisiä ilmakuvia. Ilmakuva yhdistettiin ArcScenessä maanpinnan korkeusmalliin. Visuaalisessa mallissa maan pinta näyttää siis samalta kuin ilmakuvassa ja maanpinnan korkeusvaihtelut saadaan laserkeilausaineiston perusteella. Suurin osa kuvista on peräisin vuoden 2012 kuvauksista. Joillakin taulukossa 3 esitetyillä alueilla jouduttiin käyttämään vuosien 2010-2011 ilmakuvia, koska kaikilla tarvittavilla alueilla ei vuonna 2012 suoritettu ilmakuvauksia [35].

Maanmittauslaitoksen ortokuvat ladattiin yksittäisinä karttalehtinä häviöttömästi pakatussa JPEG 2000 -muodossa Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen tiedostopalvelusta. JPEG 2000 -formaatti sisältää aineiston sijaintitiedon ja koordinaattijärjestelmänä kuvissa on ETRS-TM35FIN. Yhden karttalehden koko on 6 x 6 kilometriä ja kuvien maastoresoluutio eli pikselikoko on 0.5 metriä. TM35-lehtijaossa yhden kuvan koko on siis 12000 x 12000 pikseliä ja tallennustilaa kuva vie noin 150-200 MB. Kuvat koostuvat kolmesta värikanavasta (punainen, vihreä ja sininen), ja jokainen värikanava sisältää 256 eri sävyarvoa.

4.1.3 Muu aineisto

Satakuntaliitto toimitti shape-tiedostomuodossa tiedot tuulivoimala-alueiden rajauksista, voimaloiden ja huoltorakennusten paikoista, voimaloille johtavista huoltoteistä, voimaloiden ympärille jätettävistä ympyrän muotoisista, halkaisijaltaan hieman yli 100 metriä olevista työalueista, suunnitelluista 110 kV:n voimalinjoista sekä 400 kV:n runkolinjoista. Satakuntaliitolta saatiin myös voimaloiden napa- ja lapakorkeudet, voimalinjojen pylväiden korkeudet (30 m) sekä huoltorakennusten pohjapinta-alat (15 m x 20 m). Pylväiden väliset voimalinjan suuntaiset etäisyydet arvioitiin pääasiassa ilmakuvista. 400 kV:n voimalinjoille käytettiin 400 metrin ja 110 kV:n linjoille 250 metrin etäisyyksiä. 400 kV:n voimalinjoille käytettiin malleissa kahta rinnakkaista pylväsjonoa, joiden väliseksi etäisyydeksi arvioitiin 34 metriä. 110 kV:n voimalinjoille käytettiin vain yhtä pylväsjonoa.

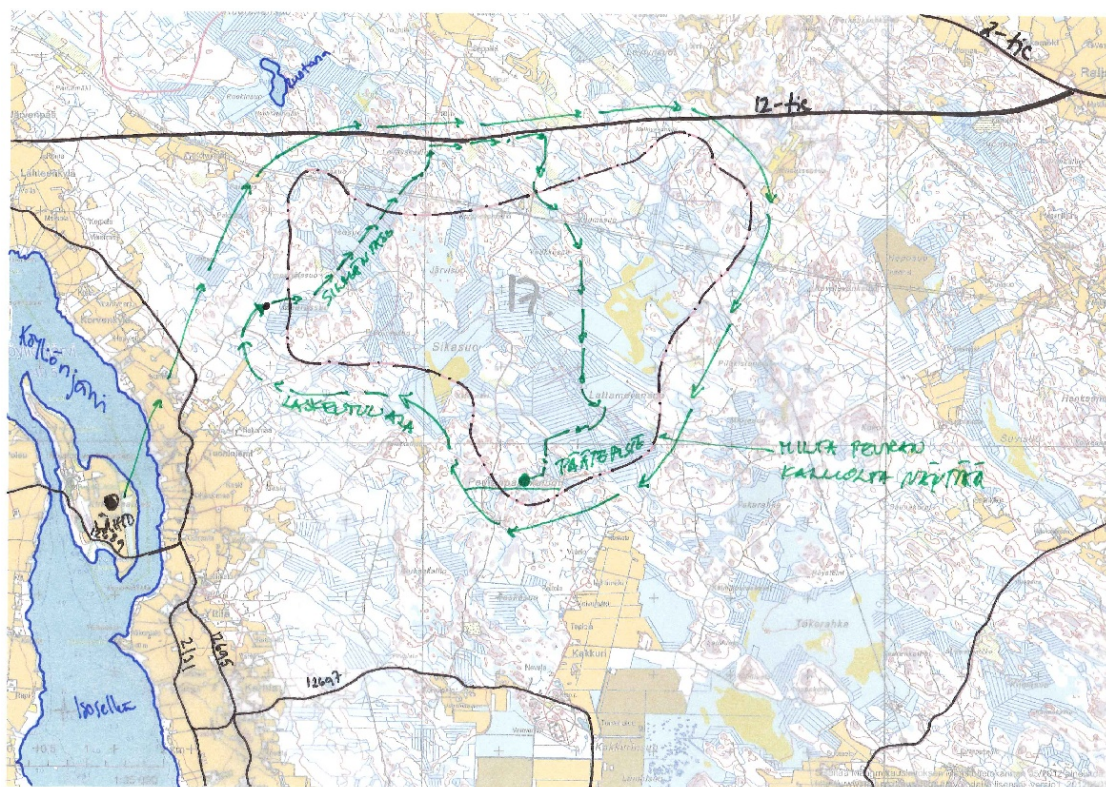
Malleissa puut poistettiin Satakuntaliiton ohjeistuksen mukaisesti voimalinjojen ympäristöstä eli rakennuskieltoalueelta siten, että 400 kV:n voimalinjassa johtokäytävän kokonaisleveys on 62 metriä ja 110 kV:n linjassa 50 metriä. Kuva 12 esittää voimalinjojen johtokäytävälle asetettuja määräyksiä [36].



Kuva 12. Suomen kantaverkkoyhtiön Fingrid Oyj:n havainnekuva, josta näkyvät maanomistajille asetettavat voimajohtoalueen käyttörajoitukset.

Suunniteltujen huoltoteiden leveys on malleissa noin 15 metriä. Satakuntaliitto toimitti lisäksi kameralinjat PDF-tiedostoina, joissa näkyy videokameran kulkema reitti peruskartalla. Esimerkkinä tästä on alueeseen 17 liittyvä piirros kuvassa 13. Yksittäisten voimaloiden paikkoja ei näy kuvan kartassa, mutta tuulivoimala-alue on merkitty mustalla pistekatkoviivalla. Vihreänä näkyvä kamerareitti lähtee ilmasta Köyliönjärvessä sijaitsevan saaren yläpuolelta ja kiertää koko ajan hitaasti laskeutuen voimala-alueen. Lopulta laskeudutaan tielle mustalla pisteellä merkityssä kohdassa hieman ennen voimala-alueelle saapumista. Sen jälkeen kamera kulkee silmän tasolla alueen sisällä olevia teitä pitkin päätepisteeseen asti, joka tämän kamerareitin tapauksessa on näkymä Peuranpäänkalliolta.

Malleihin lisättiin kolmiulotteisia talo-objekteja, jotka ovat ilmakuvassa olevien talojen paikalla, mutta eivät ole kyseisessä paikassa olevan todellisen rakennuksen näköisiä. Kaikkien ilmakuvassa näkyvien rakennusten paikalle ei lisätty objektia, mutta erityisesti alueilla, joissa rakennuksia on harvassa, pyrittiin saamaan suurin osa rakennuksista mukaan kolmiulotteiseen malliin. Puita sekä ihmistä kuvaavat symbolit olivat 3DS-tiedostomuodossa olevaa ilmaisaineistoa, jota ladattiin internetistä useista eri lähteistä.



Kuva 13. Alueen 17 kameralinjan luonnos.

4.1.4 Mallinnuksessa käytetyt sovellukset

Ilmakuva- ja lidaraineiston, kameralinjojen ja 3D-objektien esikäsittely suoritettiin pääasiassa MATLAB-ohjelmiston versiolla R2012a. Lidaraineiston käsittelyssä sekä kameralinjojen muuntamisessa ASCII-muodosta shape-tiedostoksi ja takaisin käytettiin jonkin verran myös Python-komentosarjoja. Käytetty Pythonin versio oli 2.7. Lidaraineiston käsittelyssä käytettiin lisäksi LAStools-ilmaisohjelmistoa [37].

Varsinainen visualisointi ja 3D-mallien rakentaminen esikäsittelystä datasta tehtiin ArcGIS-ohjelmiston 10.1-versiolla: kolmiulotteiset mallit luotiin ArcScenessä ja alueiden maantieteelliset rajaukset sekä 2D-kameralinjat suunniteltiin ja piirrettiin ArcMap-ohjelmalla. ArcScenellä tuotetuista stillkuvista tehtiin videot FFmpeg-ilmaisohjelmalla [38].

4.2 Maaston mallintaminen

Ennen kuin laserkeilaus- ja ilmakuva-aineistoa voitiin lähteä muokkaamaan, oli päätettävä kuinka paljon varsinaisen tuulipuistoalueen ympärillä olevaa aluetta otettaisiin mukaan. Mukaan pyrittiin saamaan isoimpia teitä, asutuskeskuksia ja järviä, joiden rannalla voidaan olettaa olevan esimerkiksi loma-asutusta. Jokaiselle alueelle määriteltiin nurkkakoordinaatit x- ja y-muodossa ja rajaukset tehtiin niiden mukaisesti. Rajauksia määriteltäessä oli otettava huomioon myös laserkeilaus- ja ilmakuvadatan suuri koko, mikä vaati runsaasti laskentatehoa ja erityisesti keskusmuistia. Näistä seikoista johtuen erityisesti kaikkein suurimpien alueiden lidar- ja ilmakuva-aineisto oli rajattava melko tiukasti tuulipuistoaluetta ympäröiviksi. Alarajana pidettiin kuitenkin noin yhden kilometrin etäisyyttä määritellystä tuulipuistoalueen reunasta.

4.2.1 Laserkeilausaineiston käsittely

Aluksi LAS-formaatissa oleva laserkeilausaineisto muutettiin ASCII-muotoon LAStools-ohjelmistopakettiin kuuluvaa las2txt-ohjelmaa käyttäen. Muunnos tehtiin, jotta molemmat työssä eniten käytetyt ohjelmistot – MATLAB ja ArcGIS – voisivat käsitellä dataa. Samalla aineisto rajattiin maantieteellisesti. Laserkeilausdatasta myös harvennettiin pisteitä. Yhteen tuulipuistoalueeseen tarvittava laserkeilausaineisto käsittää tyypillisesti kymmeniä miljoonia pisteitä. Kolmiulotteisten mallien käsittely ja videoiden tuottaminen ei olisi tietokoneiden laskenta- ja keskusmuistikapasiteettiin ja ArcScenen muistinkäsittelyyn liittyvien rajoitusten vuoksi onnistunut täydellä pistemäärällä.

Maapisteitä jouduttiin Metsäkeskuksen datassa olevien päällekkäisten lentolinjojen vuoksi hakemaan varsinaisten maanpintaa kuvaavien luokkien 2 ja 8 lisäksi myös luokasta 9 maanpinnan pisteet tunnistavaa lasground-ohjelmaa käyttäen. Ohjelma jakaa pisteet kahteen luokkaan: 2 (*ground*) ja 1 (*non-ground*). Samasta syystä Metsäkeskuksen datan tapauksessa myös puupisteitä jouduttiin luokan 5 lisäksi hakemaan luokasta 9, jossa oli sekä luokan 2 että luokan 5 pisteitä. Puupisteet otettiin lasground -ohjelmalla saadusta luokasta 1. Sekä Maanmittauslaitoksen että Metsäkeskuksen lidaraineistojen luokittelu on selostettu edellä kappaleissa 3.2.3 ja 4.1.1.

Laserkeilausaineiston pisteiden harvennus

Uudelleenluokittelun ja ASCII-muotoon muuntamisen yhteydessä sekä maanpinnaksi että kasvillisuudeksi luokiteltuja pisteitä poistettiin. Kerrallaan käsiteltiin aina yhtä lidar-lohkoa, joka oli kooltaan 3 km x 3 km. Laserkeilausdatasta poistettiin alkuharvennuksessa maanpinnan pisteitä siten, että Maanmittauslaitoksen aineistossa jokaisen 0.5 neliömetrin kokoiselle alueelle ja Metsäkeskuksen aineistossa jokaisen 1 neliömetrin kokoiselle alueelle jäi yksi piste. Koska lidar-aineistossa pisteet eivät jakaannu tasaisesti, jotkut 0.5 tai vastaavasti 1 neliömetrin kokoiset alueet jäivät tyhjäksi; harvennuksen tarkoitus oli karsia pisteitä sieltä mihin niitä oli kerääntynyt tiheämmin.

Alkuharvennuksen jälkeen maanpinnan pisteitä poistettiin vielä lisää. Yli 100 neliökilometrin tuulivoimala-alueilta poistettiin lähtökohtaisesti enemmän pisteitä kuin pienemmiltä alueilta: harvennussäde oli 1.2 metriä suuremmille alueille ja 0.8 metriä pienemmille alueille. Harvennettavat maapisteet haettiin k :n lähimmän naapurin (*k-nearest neighbor*, *k-nn*) menetelmää ja *kd*-puuta käyttäen [39]. Harvennuksessa käytettiin vain x - ja y -koordinaatteja: maapisteiden korkeusinformaatiota ei lähinaapurihaussa hyödynnetty. Kaikki jo edellä kertaalleen harvennetut maapisteet käytiin läpi, valittiin ne joilla oli vähintään yksi naapuri harvennussäteen sisällä, ja poistettiin naapurustosta vain sellaiset pisteet, jotka eivät olleet vielä aikaisemmin olleet jonkin pisteen naapurustossa. Pisteen lähin naapuri poistettiin ja seuraavaksi lähin säilytettiin. Jos harvennussäteen sisällä oli enemmän kuin kaksi naapuria, loput eli kauimmat poistettiin.

Maanmittauslaitoksen aineiston tapauksessa käytettiin puuston mallinnuksessa luokkaa 3 eli matalaa kasvillisuutta kuvaavia pisteitä. Tässä luokassa oli pisteitä moninkertaisesti enemmän kuin Metsäkeskuksen korkeaa kasvillisuutta kuvaavassa luokassa 5. Molemmista aineistoista karsittiin kuitenkin kasvillisuuspisteitä samalla menetelmällä ja parametreilla. Pisteitä harvennettiin k -lähinaapurimenetelmällä yli 100 neliökilometrin tuulivoimala-alueilla 2.5 metrin harvennussäteellä ja pienemmillä alueilla 2 metrin harvennussäteellä siten, että valittiin kasvillisuuspisteen naapurustosta aina suurimman z -koordinaatin arvon omaava piste ja muut poistettiin.

Lähinaapurihaussa käytettiin vain x- ja y-koordinaatteja: kasvillisuuspisteiden z-koordinaatteja hyödynnettiin ainoastaan korkeimpien pisteiden valinnassa.

Pisteiden harventamisen jälkeen poistettiin *outlier*-pisteet eli poikkeuksellisen korkeat tai matalat pisteet maanpinnasta. Korkeutta rajoitettiin siten, että valittiin piste, jonka arvon alapuolelle jakaumassa jäi 99.9% pisteistä ja lisättiin kyseisen pisteen arvoon vielä 75 metriä. Tätä korkeammat pisteet poistettiin. Myös pisteet, joiden z-koordinaatin arvo oli alle -5 m, poistettiin.

Maanpinnan tasoitus huoltoteiden ja työalueiden osalta

Maanpinta tasoitettiin huoltoteiden, huoltorakennusten ja voimaloita ympäröivien työalueiden kohdalta. Työalueeksi kutsutaan ympyrän muotoista, halkaisijaltaan 112 metrin aluetta kunkin voimalan ympärillä, jolta poistettiin puut ja joka väritettiin harmaaksi ilmakuvassa. Työalueet oli saatu Satakuntaliitolta monikulmiomuodossa shape-tiedostoina. Tasoitus tapahtui keskiarvottamalla monikulmion sisäpuolelle jäävien maanpinnan pisteiden korkeudet kaavan

$$z_{uusi} = \frac{z_{alkup} + 2z_{av}}{3} \quad (1)$$

mukaisesti, jossa painotettu keskiarvo z_{uusi} on kyseisen maapisteen uusi z-koordinaatti, z_{alkup} vastaava alkuperäinen z-koordinaatti ja z_{av} on työalueen sisäpuolelle jäävien maapisteen korkeuksien keskiarvo. Vastaavalla tavalla keskiarvotettiin huoltorakennusten alueiden maapisteen korkeuskoordinaatit ja samaa kaavaa käytettiin huoltoteidenkin tapauksessa. Huoltoteitä kuvaavat moniviivat jaettiin pieniin alueisiin ja tasoitettiin alueittain kaavalla 1. Alueet olivat osittain päällekkäisiä, joten pintaan ei muodostunut porrastuksia korkeusmuutoksien kohdille.

Tämän jälkeen suoritettiin tasoitetun maanpinnan muuntaminen pistepilveä kuvaavasta tekstitiedostosta rasteriksi käyttäen Python-komentosarjaa. Muunnos tehtiin keskusmuistin säästämiseksi: rasteri vie vähemmän muistitilaa kuin pistepilvi. Rasteripinta interpoloitiin käyttäen *natural neighbor* -tekniikkaa ja resoluutioksi rasterille määriteltiin 0.5 metriä [43].

Kasvillisuuspisteiden jatkokäsittely

Seuraavaksi jatkettiin kasvillisuutta kuvaavan lidar-aineiston käsittelyä MATLAB:illa. *Outlier*-puupisteet poistettiin samalla tavoin kuin vastaavat virhepisteet maanpinnastakin. Lisäksi puupisteet poistettiin voimaloiden työalueilta sekä huoltorakennuksia ympäröiviltä alueilta, joiden kooksi määriteltiin 40 m x 40 m. Huoltorakennusten paikat oli toimitettu piste-shapetiedostoina, ja huoltotiet sekä voimalinjat moniviiva-shapetiedostoina lukuun ottamatta 400 kV:n voimalinjoja, jotka

olivat monikulmio- eli polygonimuodossa. Huoltoteiltä poistettiin puut 15 metrin leveydeltä. 110 kV:n ja 400 kV:n voimalinjojen kohdalta poistettiin puut vastaavasti 50 tai 62 metrin leveydeltä.

Puiden korkeudet saatiin suoraan lidar-aineistosta laskemalla maanpinnan ja puuta kuvaavan pisteen z-koordinaatin erotus. Käsittelystä lidar-datasta poistettiin liian matalat puupisteet, kuten myös korkeat virhepisteet, jotka saattoivat olla esimerkiksi kaikuja radiomastoista. Alarajana pidettiin yhtä metriä ja myös yli 10 000 metrin pisteet poistettiin. 10 000 metriä valittiin ylärajaksi, koska virhepisteiden z-koordinaattien arvojen oli todettu olevan erittäin suuria, miljoonien suuruusluokkaa. Toisaalta Suomen korkeimmat paikat jäävät alle 2000 metriä merenpinnan yläpuolelle, joten 10 000 metriä oli turvallinen valinta myös tämän suhteen – todellisia pisteitä ei näin tullut vahingossa poistettua datasta.

Puupisteitä oli poistettava datasta, koska 3D-mallien käsittely ArcScenessä olisi ollut erittäin hidasta ja jopa mahdotonta keskusmuistin loppumisen vuoksi. Pisteiden harventaminen oli välttämätöntä myös sen takia, että laserkeilauksessa samasta puusta saattaa heijastua useita pisteitä. Jos jokaisen puupisteen paikalle olisi 3D-malleissa laitettu virtuaalipuuobjekti, puut olisivat olleet liian tiheässä. Puupisteet jaettiin korkeuden perusteella ryhmiin siten, että valittiin satunnaisesti 40 prosenttia kyseisen alueen yli 10 metrin korkuisista puista ja 20 prosenttia enintään 10 metrin korkuisista puista. Nämä valitut pisteet puolestaan jaettiin yli 10 metrin korkuisten puiden tapauksessa noin 40 000 pistettä sisältäviin piste-shapetiedostoihin. Enintään 10 metrin korkuiset puut tallennettiin kaikki samaan tiedostoon. Syy jakamiseen oli rajallinen muistikapasiteetti – jottei malli tule liian raskaaksi käsitellä, on käytännöllistä pystyä lisäämään kohtuullisen kokoisia puujoukkoja yksitellen eikä koko puumäärää kerralla. Lopullisiin malleihin tuli alueen koosta ja sen laserkeilausaineistosta riippuen noin 200 000 – 700 000 puuta. Alue tarkoittaa tässä yhteydessä edellä määriteltyjen nurkkakoordinaattien rajaamaa aluetta.

4.2.2 3D-objektien käsittely

Kolmiulotteisten objektien käsittely pystyttiin automatisoimaan hyvin pitkälle, koska jokaisella alueella käytettiin samantyyppisiä objekteja: puita, voimaloita, voimalinjoja, huoltorakennuksia, taloja, autoja ja ihmisiä. Käytössä oli kolme eri talotyyppiä ja kahden tyyppisiä autoja; kullakin alueella käytettiin kaikkia tyyppisiä. Autoja ja taloja kuvaavat 3D-symbolit haettiin ArcScene-sovelluksen symbolikirjastosta. Objektien käsittely ennen varsinaisen kolmiulotteisen mallin kokoamista ArcScenessä tehtiin MATLAB-ohjelmiston avulla. MATLAB:illa mm. laskettiin objektien paikan z-koordinaatti merenpinnan suhteen.

ArcScenessä jouduttiin määrittelemään käsin jokaiselle alueelle erikseen vain autojen paikat ja suunnat sekä ihmisten ja talojen paikat. Periaatteessa esimerkiksi talot on mahdollista erotella omaan luokkaansa laserkeilauksessa ja näin paikantaa ne automaattisesti. Käytetyissä lidaraineistoissa ei taloja kuvaavia pisteitä kuitenkaan oltu eroteltu muusta datasta, joten malleissa olevien talojen paikat oli katsottava ilmakuvista.

Käsin tehtävää työtä vähensi erittäin paljon jokaiselle alueelle kopioitava ArcScene-dokumenttipohja (.sxd, josta on kerrottu hieman enemmän kappaleessa 3.4), jossa käytettiin suhteellisia hakemistoviittauksia: kolmiulotteinen malli rakennettiin esikäsitellyistä datoista ja objekteista ja suurin osa objektiryhmien perusominaisuuksista määriteltiin vain yhden kerran jonkin tietyn alueen sxd-dokumentissa. Tämän jälkeen kopioitiin kyseinen dokumentti muille alueille, jonka jälkeen hakemistorakenteet olivat automaattisesti oikein ja ArcScene löysi kuhunkin alueeseen tarvittavan datan oikeasta paikasta. Tämä oli mahdollista, koska jokaisella alueella oli identtinen hakemistorakenne ja tiedostojen nimet.

ArcScene-dokumenttiin oli tallennettu kameralinjat, käsitelty ilmakeku ja tarvittavat kolmiulotteiset objektit. Lisäksi siinä oli määritelty objekteihin liittyviä tietoja kuten kussakin objektiryhmässä käytettävä kuvasymboli (esimerkiksi auton saattoi olla paketti- tai henkilöauto), voimaloiden väri, puiden kirkkaus, sähköpylväiden korkeudet, huoltorakennuksen koko, ihmisobjektin korkeus (1.75 metriä), objektien suuntaustiedot eli kierto z-akselin suhteen ja tieto siitä, millä perusteella objektin korkeus merenpinnasta määräytyi.

Voimalinjojen luominen

Satakuntaliitto toimitti voimalinjojen keskilinjat moniviiva-shapetiedostoina, joiden avulla määritettiin sähköpylväiden paikka- ja suuntaustiedot. 400 kV:n linjan tapauksessa tehtiin ensin keskilinjan molemmiin puoliin rinnakkaiset kopiot, jotta saatiin kaksi vierekkäistä pylväsjonoa. 110 kV:n linjoissa käytettiin vain yhtä pylväsjonoa. Pylväiden välisten etäisyyksien määrittely on selostettu kappaleessa 4.1.3.

Yksittäisten pylväiden paikat ja suuntaus voimalinjojen mukaan laskettiin MATLAB:in avulla. Lähtötietoina oli annettu keskilinja, pylväsväli ja pylväsrivin etäisyys keskilinjasta. Keskilinjan mukaan laskettu pylväiden suunta asteina välillä 0...360 sekä niiden paikan tasokoordinaatit tallennettiin piste-shapetiedostoihin. ArcScenessä liitettiin shape-tiedoston pisteisiin pylvästä kuvaava kolmiulotteinen symboli ArcScenen symbolikirjastosta ja määriteltiin sille korkeus.

Puiden lisääminen malliin

Luonnollisen metsämaiseman saavuttamiseksi käytettiin useita eri puulajeja kuvaavia 3D-symboleja. Käytössä oli kuusia, koivuja ja mäntyjä. Yhdestä noin 40 000 puuta

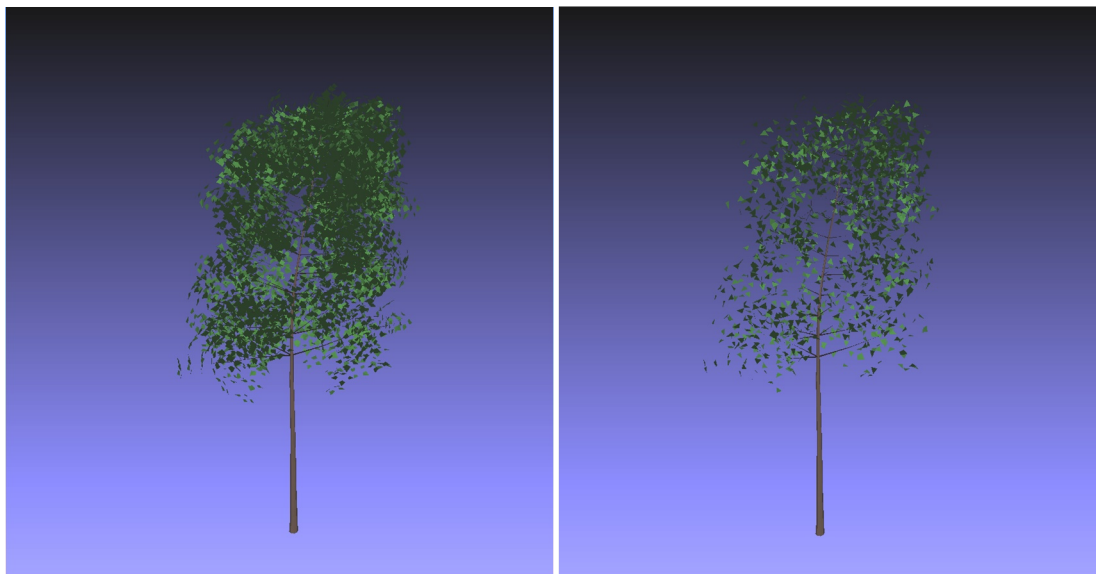
sisältävästä piste-shapetiedostosta jaettiin ArcScenessä puupisteet joissakin tapauksissa kahteen osaan (esimerkiksi 5 000 ja 35 000 puuta) niin että kumpaakin osaa vastasi oma 3D-puusymbolinsa, esimerkiksi koivu tai mänty. Menettelyn syynä oli yksinkertaisesti se, että mänty ja kuusi ovat koivuja yleisempiä puulajeja Suomen metsissä, joten niitä piti 3D-mallissakin näkyä enemmän.

Puiden korkeudet ja paikat oli laskettu suoraan lidar-aineistosta, kuten kappaleessa 4.2.1 on kuvattu. MATLAB:ia käyttäen puille laskettiin satunnainen suuntaus eli kierto z-akselin suhteen, jotta saatiin luonnollista vaihtelua. Lopuksi ArcScenessä vain liitettiin kutakin puutyyppiä kuvaavaan shape-tiedoston osaan sopiva 3D-symboli.

Kolmiulotteiset puuobjektit koostuivat alunperin kymmenistä tuhansista polygoneista – yhdessä puussa saattoi olla jopa 30 000 kolmion muotoista polygonia. Tietokonegrafiikassa polygoni on kaksiulotteinen pinta, joka muodostuu kärkipisteistä ja niitä yhdistävistä reunaviivoista. Yksinkertaisin kaksiulotteinen kappale, josta polygoni voi muodostua, on siten kolmio. Polygonien avulla voidaan mallintaa kolmiulotteisia kappaleita vektorigrafiikan avulla. 3D-grafiikassa yleisimmin käytössä olevia polygoneja ovat kolmio ja nelikulmio.

ArcScene pystyy käsittelemään vain rajallisen määrän polygoneja, koska se lähettää näytönohjaimelle piirrettäväksi kaikki mahdolliset ArcScene-dokumentissa olevat, näkyväksi (*visible*) merkityt puut riippumatta siitä, ovatko ne todellisuudessa tietokoneen näytöllä näkyvissä vai eivät. Jos alueella on esimerkiksi 300 000 puuta, ja jokaisessa puussa on 10 000 polygonia, laskettavia polygoneja on 3 miljardia. Tällainen polygonimäärä olisi johtanut ohjelman toiminnan sietämättömään hidastumiseen.

Metsästä olisi tullut liian harva jos puiden lukumäärää olisi rajoitettu kovin paljon, ja tämän vuoksi päädyttiin vähentämään yksittäisen puuobjektin polygonimäärää. Se saatiinkin vähennettyä muutamaa tuhatta (2000 – 3000 kappaletta) editoimalla puuobjekteja Autodesk 3ds Max -ohjelmistolla ja tuomalla ne ArcSceneen OpenFlight (.flt)-muodossa. Alla olevassa kuvassa 14 on esimerkki puusta ennen käsittelyä ja sen jälkeen. Näin kevennetyillä puillakin ArcScenen käsittelykapasiteetti loppui noin 800 000 puun kohdalla, jolloin ohjelma yksinkertaisesti lakkasi toimimasta.



Kuva 14. Kolmiulotteinen puuobjekti. Vasemmanpuoleinen kuva on alkuperäinen (18 412 polygonia). Oikeanpuoleinen puu koostuu käsittelyn jäljiltä 2 408 polygonista.

Realistisen värisävyn löytäminen puille tuotti hieman hankaluuksia, koska lähellä maanpintaa puut näyttivät taivasta vasten katsottuna usein liian tummilta, kun taas korkealta ilmasta nähtynä ne saattoivat olla kirkkaan vihreitä. Kompromisseja kirkkauden suhteen oli tehtävä, koska samassa videossa saatettiin liikkua sekä ilmassa että maassa. ArcScenessä säädettiin vain puiden kirkkautta harmaasävyjä käyttäen, varsinainen väri oli itse kolmiulotteisen puuobjektin ominaisuus.

Muut objektit

Autoja ja taloja kuvaavat 3D-symbolit haettiin suoraan ArcScenen mukana tulevasta symbolikirjastosta. Kutakin objektiryhmää – esimerkiksi pakettiautot, henkilöautot tai tietynlaiset talot – vastasi yksi piste-shapetiedosto, joka sisälsi yksittäistä objektia vastaavat pisteet ja kentät, jotka määrasivät objektiin liittyvän suuntauksen asteina, korkeuden merenpinnasta metreinä ja koon metreinä. Ihmisten, rakennusten ja autojen satunnainen suuntaus ja korkeus merenpinnasta laskettiin MATLAB:illa, ja suuntausta muutettiin tarvittaessa jälkikäteen ArcScenessä: esimerkiksi autot oli käännettävä yksitellen tien suuntaisiksi. Voimaloiden korkeus tietyllä alueella oli määritelty kyseisen alueen parametreissa, joka oli rakenteeltaan MATLAB:in strukturi (*struct*). Muiden objektien koot määriteltiin yhden kerran käsin jonkin yksittäisen alueen ArcScene-dokumentissa ja kopioitiin kyseinen dokumentti muille alueille.

4.3 Ilmakuvien käsittely

Alkuperäisille ortokuville tehtiin lukuisia muokkauksia. Lähtöaineistona olevat kuvat oli oikaistu ja kohdistettu, mutta niille ei oltu tehty minkäänlaista värikorjausta. Jotta maanpinnasta saataisiin visuaalisesti enemmän todellisuutta vastaava, kuvia oli

korjattava. Niistä häivytettiin lentolinjarajoja, tehtiin värisäätö, yhdistettiin korjatut kuvat yhdeksi isoksi kuvaksi ja rajattiin näin saatu kuva halutun kokoiseksi. Lopuksi voimaloiden ja huoltorakennusten ympäristöt ja huoltotiet väritettiin ilmakehään harmaata sepeliä muistuttaviksi.

Lentolinjarajojen korjaus ja värien säätö

Maanmittauslaitoksen alkuperäisten ilmakuvien perusongelma oli, että yksittäisen kuvan sisällä oli selkeästi näkyviä lentolinjarajoja, eli intensiteetti vaihteli rajan eri puolilla. Tämä johtuu siitä, että kuvaukset on tehty eri ajankohtina, jolloin valaistus- ja sääolosuhteet ovat luonnollisesti vaihdelleet. Vuodenaika sekä auringon asema vaikuttavat valoisuuteen ja kontrastiin, ja ilmakehän olosuhteet saavat aikaan värivirheitä. Alkuperäiset kuvat ovat yhdistelmiä eri aikoina otetuista kuvista. Kuvassa 15 näkyy osa alueen 18 ilmakuvasta: yläpuolella on alkuperäinen ja alhaalla käsitelty. Alkuperäisen kuvan vasemmassa yläpuoliskossa sininen komponentti on ylikorostunut ja kontrasti pienentynyt auringon matalasta kulmasta johtuen. Käsitellyssä kuvassa voidaan havaita kontrastin ja värikylläisyyden lisääntyminen.

Lohkorajojen korjaus jälkikäteen MATLAB:illa osoittautui varsin haastavaksi tehtäväksi ja lopputulos oli, että lähinnä ilmakuvien värejä saatiin parannettua – esimerkiksi metsän väriä muokattiin kirkkaamman vihreäksi. Lentolinjarajat jäivät lopullisiin kuviin melko näkyviksi. Tästä ei lopputuloksen kannalta ollut suurta haittaa, sillä objektipuut peittivät rajat valmiissa malleissa riittävän hyvin.

Kuvankäsittelyprosessi aloitettiin muuntamalla alueeseen tarvittavat alkuperäiset Maanmittauslaitoksen ilmakuvat JPEG 2000 -formaattista GeoTIFF-muotoon, koska JPEG 2000 -muodossa mukana olevaa georeferointitietoa ei muuten olisi saatu MATLAB:in käyttöön. Yhteen tuulivoimala-alueeseen tarvittiin 2-6 ilmakuvaa. Kuvien värinsäätöprosessi on esitetty kaaviossa 2 ja prosessia havainnollistavat esimerkit kuvissa 16 - 21. Ensin kuvasta estimoitii värivirhe laskemalla kirkkaimpien vihreiden pikselien arvoista säätökuva. Vihreät pisteet etsittiin metsien alueelta, koska luonnossa metsät ovat tasavärisiä vertailukohtia. Värivirhe voitiin estimoida niiden avulla. Alkuperäisestä kuvasta (kuva 16) valittiin aluksi kaikki vihreät pikselit. Nämä näkyvät kuvassa 17 valkoisina alueina. Seuraavaksi pienistä kuvan lohkoista (12 x 12 pikseliä) laskettiin keskihajonta. Keskihajonta laskettiin ainoastaan lohkon sinisen värikomponentin arvoista. Alueet, joilla hajonta oli pientä (järvet ja pellot) tai suurta (kylät), poistettiin valituista vihreistä pikseleistä. Keskihajontaa apuna käyttäen valittiin vihreistä pikseleistä metsäiset alueet, mikä näkyy valkoisina alueina kuvassa 18. Näistä valittiin vielä kirkkaimmat vihreät pikselit, eli varjoja sisältävät alueet jätettiin pois. Värivirheen estimaatti eri kanaville laskettiin sovittamalla pinta kanavilta valittujen pisteiden ja niiden paikkojen perusteella.

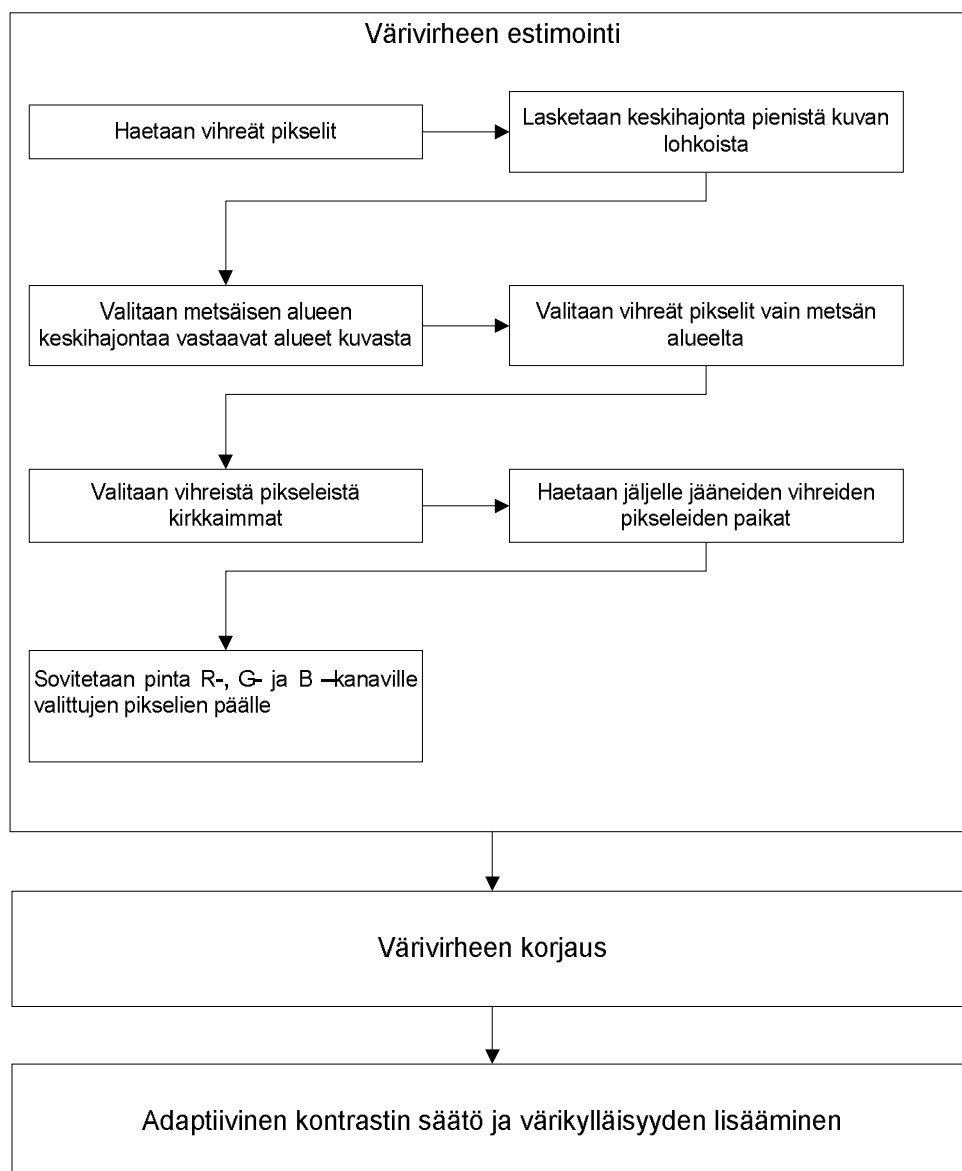


Kuva 15. Ylempänä osa alueen 18 alkuperäisestä ilmakuvasta, alempana sama kuva värisäätöjen jälkeen. Oikean laidan pellossa (rajattu punaisella suorakaiteella) näkyy värikorjauksen yhteydessä suoritetusta interpolaatiosta johtuvia valkoisia täpliä. Kuvassa näkyvät myös harmaaksi väritetyt huoltotiet ja voimaloiden työalueet.

Värivirhe korjattiin vähentämällä kuvassa 19 esitetty estimoitu virhe alkuperäisestä kuvasta. Kuva 20 esittää toimenpiteen tulosta. Lopuksi kuvan kontrastia ja värikylläisyyttä säädettiin adaptiivisesti lohkoittain, koska kuvan eri alueet poikkeavat toisistaan kontrastin suhteen. Tavallisesti kontrasti säädetään koko kuvasta, mutta tässä

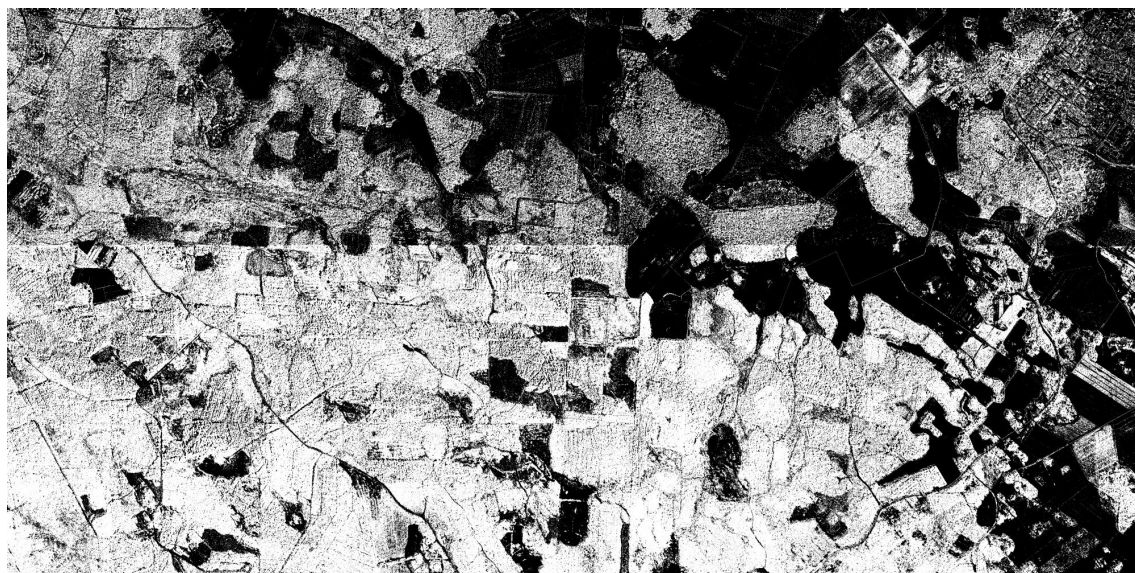
tapauksessa laskennassa käytettiin vain pieniä kuvan osa-alueita. Kuvan värikylläisyyttä eli värien voimakkuutta kasvatettiin, ja näin saatiin esimerkiksi metsäalueet kauniin vihreiksi. Sarjan viimeisessä kuvassa 21 on värisäätöjen lopputulos.

Kaavio 2. Ilmakuvien värien säätämiseen käytetyn algoritmin lohkokaavio.





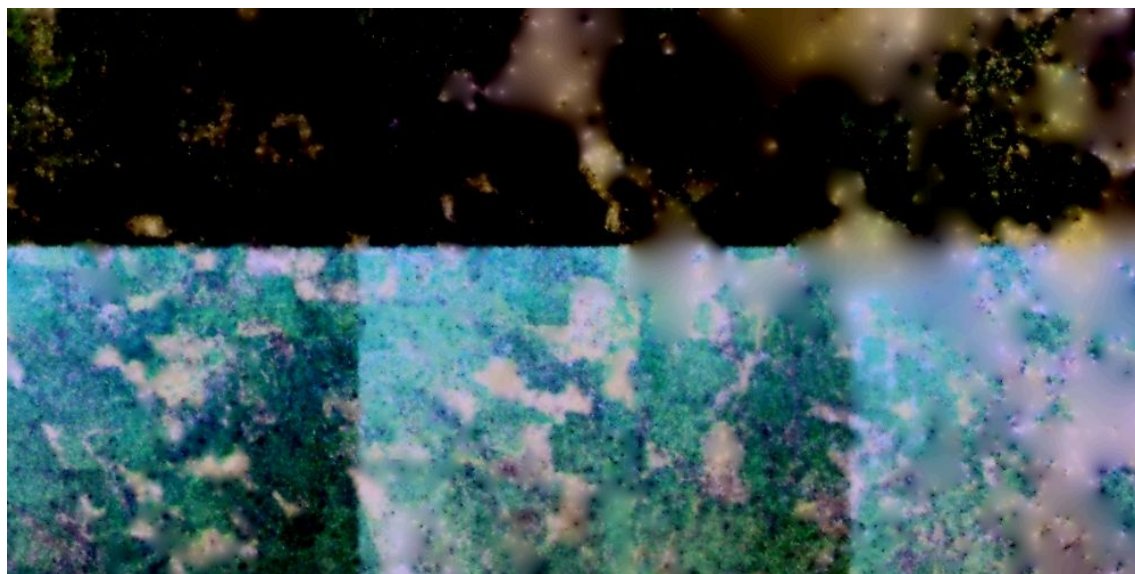
Kuva 16. Osa alueen 12 alkuperäisestä ilmakuvasta.



Kuva 17. Kuvassa 16 esitetty alue, jossa vihreät pikselit on merkitty valkoisena.



Kuva 18. Kuvissa 16 ja 17 esitetty alue, jossa valkoisella on merkitty vain metsäisten alueiden vihreät pikselit.



Kuva 19. Estimoitu värivirhe. Kuvassa R-, G- ja B-komponentit ovat päällekkäin.



Kuva 20. Kuva ennen kontrastin ja värikylläisyyden säätöä.



Kuva 21. Kuvassa 16 esitetty alue värivirheen korjauksen sekä kontrastin ja värikylläisyyden säätöjen jälkeen.

Huoltoteiden ja työalueiden värien muokkaus

Kun yksittäisten ilmakuvien värisäätö oli tehty, niistä muodostettiin maantieteellisesti halutun kokoiseksi rajattu kuva käsittelyn kohteena olevasta tuulivoimala-alueesta. Voimaloita ja huoltorakennuksia ympäröivät, harmaata soraa muistuttavat alueet sekä huoltotiet tehtiin kuviin Satakuntaliitolta saatujen shape-tiedostojen avulla. Voimaloiden ja huoltorakennusten paikat olivat pistemuodossa, ja tiet moniviivamuodossa.

Kuvapistheet väritettiin harmaiksi huoltorakennusten ympäristössä neliönmuotoiselta ja voimaloiden ympäristössä ympyränmuotoiselta alueelta käyttäen samoja mittoja kuin laserkeilausaineistoakin käsiteltäessä (kappale 4.2.1). Huoltotiet väritettiin 15 metrin leveydeltä käyttäen keskiviivana annettua moniviivaa. Sopivan vaihteleva väritys saatiin aikaan harmaasävykohinalla. Yksittäiselle pikselille valittiin satunnainen intensiteetti-arvo tasajakaumasta väliltä 102...152. Koska kyseessä olivat harmaasävyt, R-, G- ja B-komponenteilla käytettiin kaikilla samaa arvoa.

5 KUVAMATERIAALIN TUOTTAMINEN

Tässä luvussa on kuvattu lopullisen stillkuva- ja videomateriaalin tuotantoprosessi. Aluksi käsitellään kahta vaihtoehtoista tapaa mallintaa puusto, joista lopulta valittiin visuaalisesti korkeatasoisempi 3D-objekteja hyödyntävä menetelmä. Tutkimusprojektin tärkeimpänä päämääränä oli tuottaa esittelyvideoita, ja tätä tarkoitusta varten oli luotava kameralinjat eli reitit, joita videokameran tuli 3D-malleissa seurata. Näiden suunnittelua ja käytännön toteutusta käydään läpi kappaleessa 5.2. Lopuksi käsitellään lyhyesti videoiden tekoa käytännössä sekä videotuotannon yhteydessä esiintyneitä ongelmia.

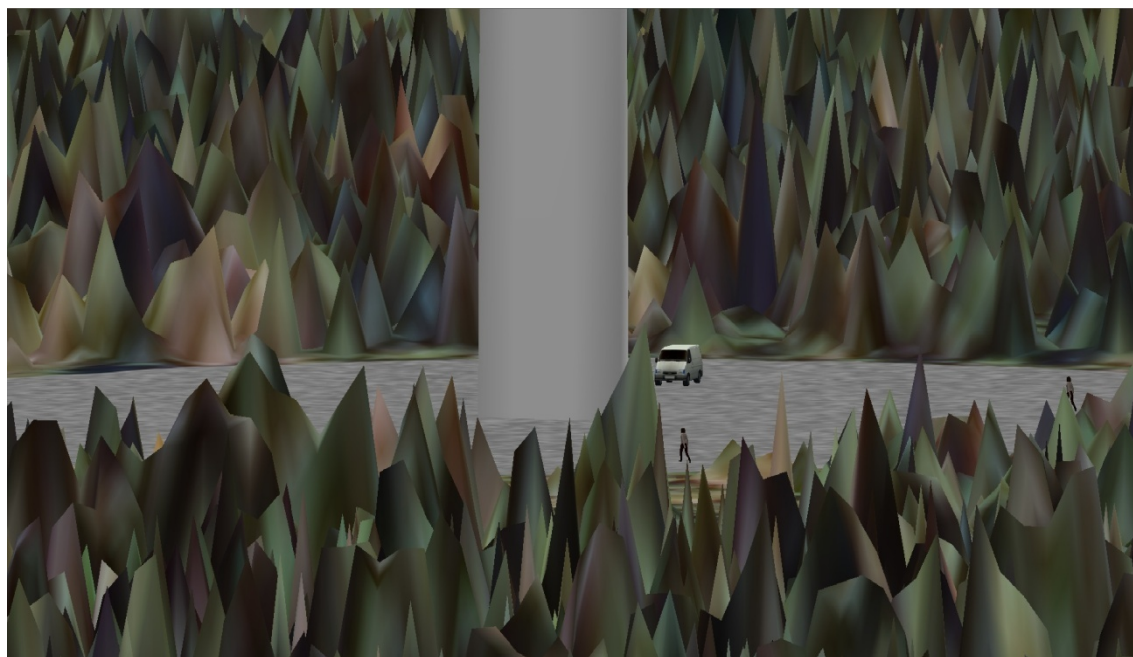
5.1 Kolmiulotteisen mallin luominen

Tutkimusprojektin alkuvaiheessa maanpintaa ja puita kuvaavan mallin konstruoinnissa oli käytössä kaksi eri tapaa johtuen tietokonekapasiteetin rajallisuudesta käsiteltävän datan kokoon nähden. Toisessa pintamalli interpoloitiin *natural neighbor* -menetelmällä käyttäen sekä harvennetun pistepilven maanpinta- että kasvillisuuspisteitä siten, että harvennetut kasvillisuuspisteet ja maanpinnan pisteet yhdistettiin TIN-pinnaksi, jossa puiden latvat erottuivat terävinä huippuina. Toinen tapa erosi edellisestä ainoastaan siinä, että maanpinnan pisteistä muodostettiin maastomalli samalla interpolaatiotekniikalla ja kasvillisuuspisteitä käytettiin ainoastaan objektipuiden paikkojen ja korkeuksien määrittämiseen.

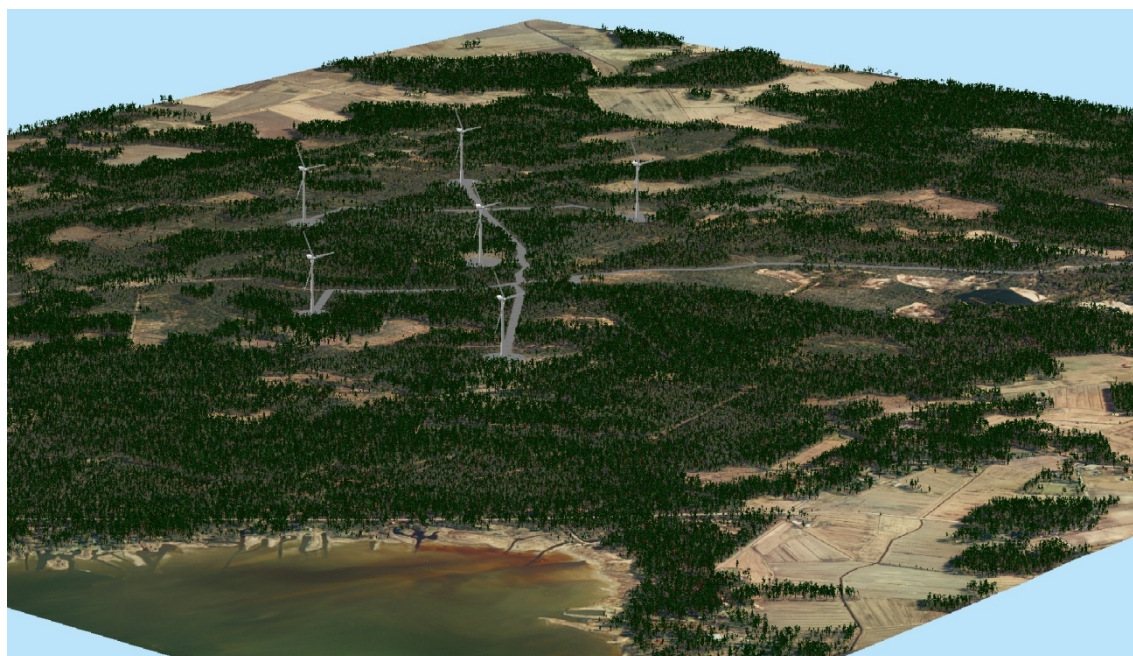
Juuri puut erottavat nämä kaksi esitystapaa toisistaan – korkeusmalli, ilmakehä ja kaikki 3D-objektit puita lukuunottamatta ovat samat. Ensin mainitulla tekniikalla tuotetussa mallissa, josta esimerkkinä on kuva 22, puut ovat pyramidimaisia ja koostuvat terävistä kulmista. Se on nopea laskea tietokoneella: mallia voidaan ArcScenessä helposti siirtä tarkastelemaan eri kuvakulmista ja myös videoihin tarvittavien stillkuvien tuottaminen käy nopeasti. Malli ei sovellu lähellä maanpintaa tapahtuvaan tarkasteluun epärealistisuutensa vuoksi. Tämä visuaalisesti heikomman tuloksen tuottava tapa pystyttiin kuitenkin hylkäämään.

Laskennallisesti raskaampi, mutta näyttävämmän lopputuloksen tuottava tapa saatiin toteutettua automatisoimalla ja optimoimalla datan käsittelyä sekä mm. muokkaamalla kolmiulotteisia puuobjekteja laskennallisesti kevyemmiksi. Tuloksena oli lähitarkasteluun soveltuva malli (esimerkkinä kuvat 23 ja 24), jossa käytettiin suhteellisen luonnollisen näköisiä objektipuita. Alun perin tarkoitus oli käyttää tätä tapaa vain alle 7 neliökilometrin kokoisilla tuulivoimala-alueilla, mutta edellä

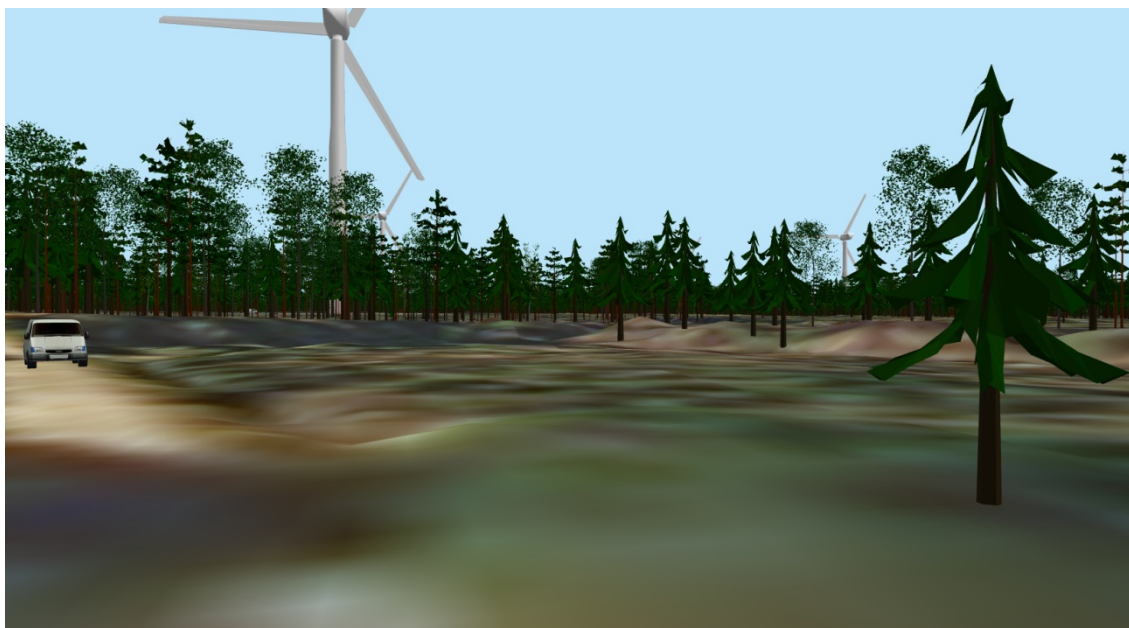
mainittujen ohjelmakoodien optimoinnin ja puuobjektien rakenteen keventämisen ansiosta sitä voitiin siirtyä käyttämään kaikenkokoisilla alueilla.



Kuva 22. Lähikuva alueelta 12. Pintamalli on luotu yhdistämällä maanpintaa ja puita kuvaava lidardata.



Kuva 23. Yleisilmaukuva alueen 12 3D-mallista. Kamera on noin 450 metrin korkeudella. Tämä oli lopullisessa Satakuntaliiton kuvamateriaalin tuotannossa käytetty malli.



Kuva 24. Lähikuva alueelta 12. Satakuntaliiton kuvamateriaalin tuotannossa käytetty malli.

ArcScenessä käytettiin noin 2 metrin resoluutiota maastomallille, jotta keskusmuistia ei kuluisi liikaa. Alun perin rasteri oli laskettu 0.5 metrin resoluutiolla kappaleessa 4.2.1 kuvatulla tavalla.

5.2 Kameralinjat

Videoiden tekoa varten oli suunniteltava ja toteutettava reitit, joita kameran haluttiin kullakin tuulipuistoalueella seuraavan. Kameralinjojen suunnittelussa oli monia huomioon otettavia yksityiskohtia. Esimerkiksi korkealta ilmasta alas laskeutuvien kameralinjojen tapauksessa oli vältettävä metsän läpi laskeutumista puiden vilinän vuoksi. Tieosuuksilla taas piti seurata tarkasti tietä poikkeamatta ojan puolelle ja huolehtia siitä, että videossa näkyy koko ajan kyseistä tietä. Kuvassa 25 on tyypillinen 2D-kameralinja, joka lähtee ilmasta ja laskeutuu tielle. Tieosuus näkyy tiheämpänä pistejonona.

Tavoitteena oli tuottaa visuaalisesti miellyttäviä, rauhallista vauhtia eteneviä videoita, jotka esittelisivät tuulipuiston ja sitä ympäröivän alueen mahdollisimman totuudenmukaisena katsojalle. Yksittäisen videon kestoksi tuli noin 2-7 minuuttia.

Kompromisseja oli tehtävä muun muassa videon nopeuden ja pituuden suhteen: jotkut alkuperäiset kameralinjaluonnokset olivat niin pitkältä matkalta, että yksittäisen videon keston lyhentämiseksi ne katkaistiin useaan osaan. Videoiden lopetuskohdaksi pyrittiin valitsemaan paikka, jossa ihmiset yleensä liikkuvat tai jossa on asutusta – kuten tie tai esimerkiksi alueen 14 tietä pitkin kulkevan videon tapauksessa Leineperin ruukkikylä.

Videokameralinjat piirrettiin ArcMapissa ensin kaksiulotteisina Satakuntaliitolta saatujen ohjeiden ja piirrosten mukaisesti ja tallennettiin moniviiva-shapetiedostoina, minkä jälkeen ne muunnettiin ASCII-muotoon jatkokäsittelyä varten: kameralinjoihin mm. lisättiin pisteitä ja niistä tehtiin kolmiulotteisia lisäämällä niihin z-koordinaatit MATLAB:in avulla. Lopuksi valmis kameralinja muunnettiin tekstimuodosta takaisin moniviiva-shapetiedostoksi ArcSceneen viemistä varten.

5.2.1 Aloitus ilmasta maahan laskeutuen

Kaikista alueista tehtiin video, jossa lähdettiin ilmasta 450 metrin korkeudesta, kierrettiin tuulipuisto koko ajan alemmaksi laskeutuen ja päädyttiin lopulta noin 1.8 metrin korkeuteen maanpinnasta. Tarkoituksena oli antaa katsojalle yleiskuva alueesta. Useimmissa videoissa laskeutumiskohtana oli tie, josta jatkettiin toisessa videossa itse tuulivoimala-alueelle. Joillakin alueilla laskeutumispisteenä oli jokin erityinen paikka josta haluttiin loppunäkymä – esimerkiksi alueella 14 Salomonkallion virkistysalue – tai maaston korkea kohta, kuten alueella 17 Peuranpäänkallio.

Kullekin alueelle oli määritelty solmu (*vertex*), jossa ihmissilmän tasolle laskeutuminen tapahtui. Solmulla tarkoitetaan tässä yhteydessä alkuperäisen kaksiulotteisen moniviivakameralinjan pistettä, joka sijaitsee moniviivan kahden osaviivan liitoskohdassa. Lisäksi aluekohtaisesti oli määritelty myös kameralinjan lopussa oleva solmuväli, jolla edettiin kävelyvauhtia. Joihinkin videoihin tehtiin sen avulla muutaman sekunnin loppuhidastus.

Piirrettyihin kaksiulotteisiin kameralinjoihin lisättiin MATLAB:issa ASCII-muotoon muuntamisen jälkeen uusia pisteitä interpoloimalla. Pisteiden lisäämiseen oli kaksi syytä. Ensinnäkin videokameran etenemisnopeutta kameralinjaa pitkin haluttiin säädellä ArcScenessä lentokorkeuden mukaan: mitä korkeammalla oltiin, sitä nopeammin kameran haluttiin etenevän. Tätä varten tarvittiin kameralinja, jossa oli solmuja sitä tiheämmässä, mitä lähempänä maata oltiin. Korkealla ilmassa solmuja oli harvemmassa. ArcScenessä kamera määriteltiin kulkemaan yhdessä aikayksikössä yhden solmuvälin, ja tällä tavoin saatiin säädeltyä kameran etenemisnopeutta.

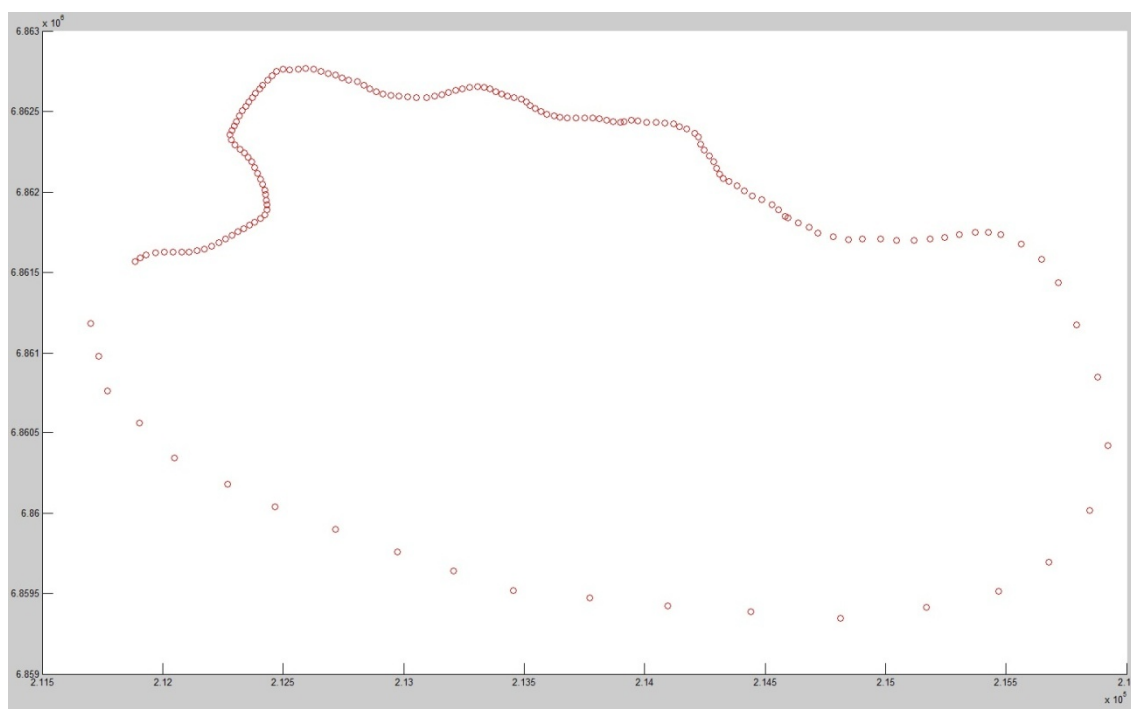
Toisena syynä pisteiden lisäämiseen oli se, että piirretyissä kaksiulotteisissa kameralinjoissa oli melko vähän pisteitä ja näin ollen niissä esiintyi jyrkkiä kulmia, mikä aiheutti kameran liikkeeseen kulmikkuutta. Myös ArcScenessä voidaan säätää tarkkuutta, jolla kamera seuraa kameralinjaa ja siten pehmentää kulmia. Kokeilujen jälkeen päädyttiin tekemään työ MATLAB:in avulla, koska näin saavutettiin parempi lopputulos.

Pisteitä lisättiin MATLAB:in *pchip*-funktioita (*Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial*) käyttäen. Alkuperäisen kameralinjan pistemäärään verrattuna

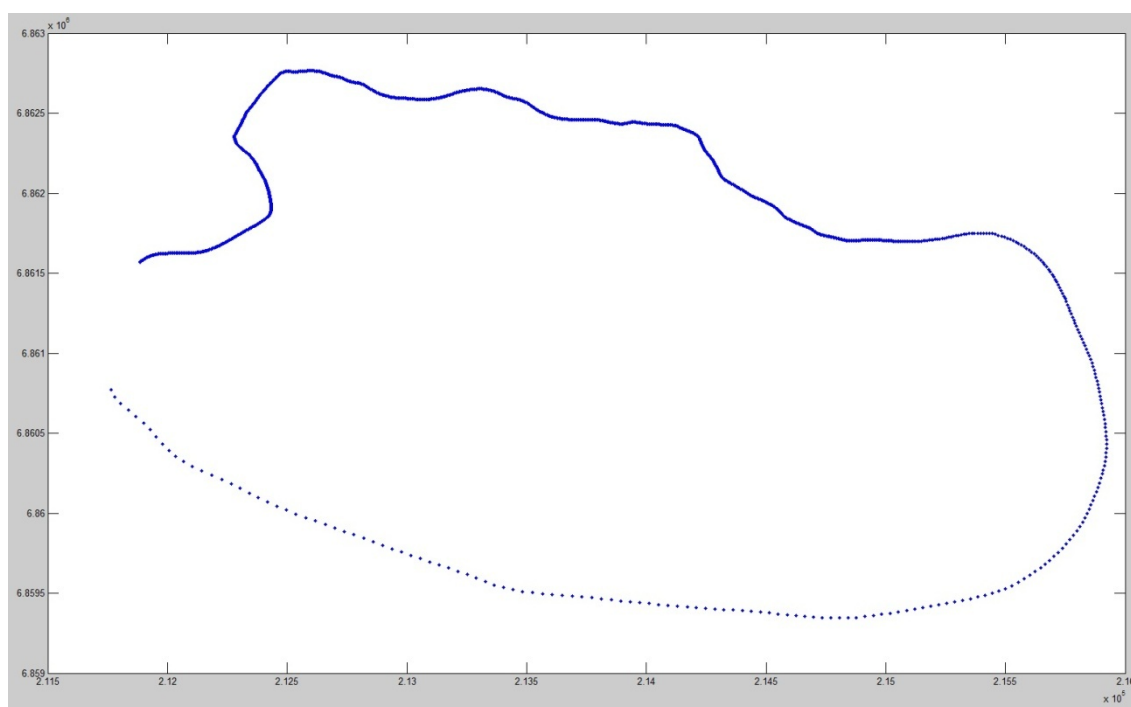
interpoloituun kameralinjaan tuli kahdeksankertainen määrä pisteitä. Tämä menetelmä sopi hyvin kulmien pyöristämiseen, koska siinä interpolaatiopolynomi seuraa melko tarkasti alkuperäisiä datapisteitä: polynomi käyttäytyy monotonisesti samoilla väleillä kuin alkuperäinen data, ja se saavuttaa paikalliset ääriarvonsa samoissa pisteissä.

Erityisesti tieosuuksilla oli tärkeää, että interpoloitu kameralinja seurasi tarkasti tietä. 2D-kameralinjoja ArcMap-sovelluksessa piirrettäessä oli huomioitava interpolaatio siten, että kameralinjan tieosuuksilla tuli olla solmuja riittävän tiheässä. Jos niitä oli liian harvassa, interpolointivaiheen jäljiltä kameralinja saattoi poiketa tieltä paljonkin. Kuvassa 26 on 2D-kameralinja pisteiden lisäämisen jälkeen.

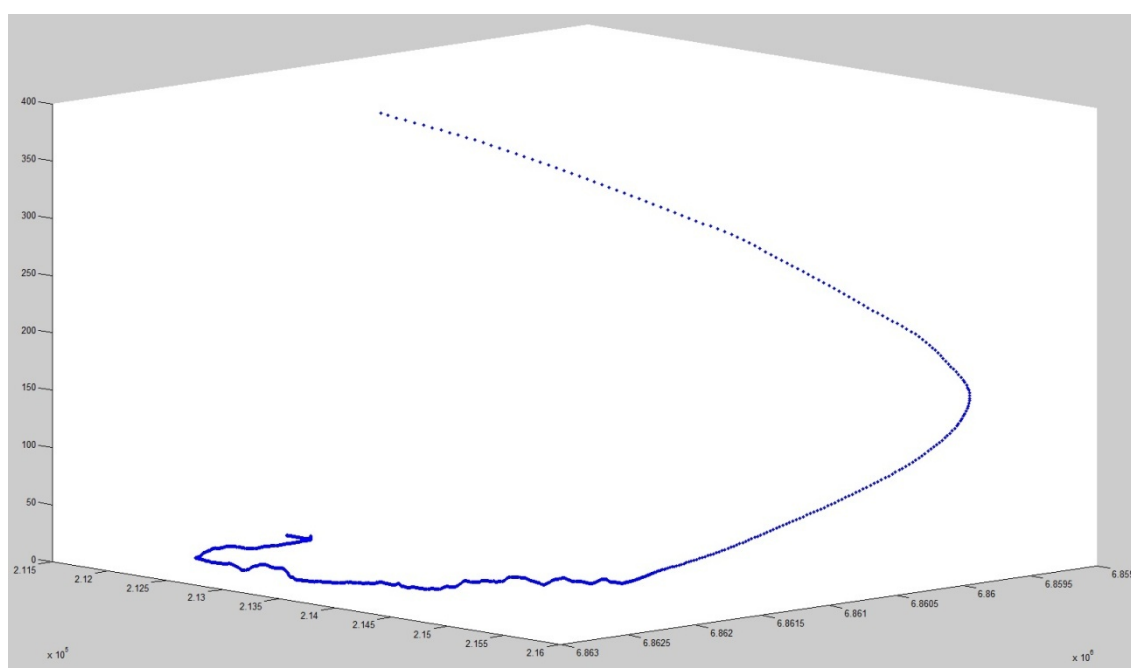
Interpoloinnin jälkeen kameralinjoista tehtiin kolmiulotteisia, tasaisesti laskeutuvia moniviivoja lisäämällä niihin korkeuskoordinaatit MATLAB:in avulla. Silmän tasolla kulkevan kameralinjan osan korkeuskoordinaateille tehtiin mediaanisuodatus. Mediaanisuodatin korvaa pisteen arvon kyseisen pisteen ympäristön arvojen mediaanilla. Kameralinjapisteiden suodatuksessa käytettiin kolmen pisteen kokoista ympäristöä. Suodattamalla kamera saatiin kulkemaan korkeussuunnassa tasaisemmin tietä pitkin. Lopputuloksena oleva kameralinja on esitetty kuvassa 27.



Kuva 25. Alueen 20 alkuperäinen kaksikulotteinen kameralinja.



Kuva 26. Alueen 20 kaksiulotteinen kameralinja, johon on lisätty pisteitä.



Kuva 27. Lopullinen, kolmiulotteinen alueen 20 kameralinja pisteiden ja z-koordinaattien lisäämisen jälkeen.

5.2.2 Tietä pitkin

Jokaiseen alueeseen liittyi myös yksi tai useampi video, jossa kuljettiin tuulivoimala-alueen läpi tai viereistä tietä pitkin. Videoissa kamera kulkee noin 1.8 metrin korkeudella maanpinnasta. Kamerareittien suhteen pyrittiin siihen, että kyseistä tietä näkyisi videossa. Tien vieressä tiheän puuston kohdalla saattoi paikoitellen tulla puita vilisevä näkymä, joka oli visuaalisesti epämiellyttävä. Monessa tapauksessa ilmiö oli kuitenkin lyhytkestoinen ja pidemmällä tieosuuksilla kameran hidastus auttoi hieman asiaa. Kuten ilmassa kulkevien kamerareittienkin tapauksessa, kaksiulotteisiin kameralinjoihin lisättiin pisteitä interpoloimalla sekä laskettiin niille z-koordinaatit, joille suoritettiin mediaanisuodatus käyttäen viiden pisteen ympäristöä. Joihinkin videoihin tehtiin myös hidastus loppuun, eli kamera etenee muutaman viimeisen sekunnin ajan kävelyvauhtia.

5.3 Stillkuvien ja videoiden tuottaminen

Stillkuvamateriaali videoita varten tehtiin ArcScenen animaatiotyökaluilla. MATLAB:illa puolestaan tehtiin videoiden alussa 10 sekunnin ajan näkyvät informaatiokuvat, josta esimerkkinä on kuva 28. Niissä näkyvät perustiedot alueen koosta, voimaloiden määrästä ja niin edelleen. Lopuksi informaatiokuvat sekä varsinaisen videon kuvat yhdistettiin .avi-videoksi FFmpeg-ilmaisohjelman avulla. Videot tehtiin sarjasta stillkuvia, koska kuvia tarvittiin muihinkin tarkoituksiin kuin pelkästään videoihin, ja tällä tavoin niitä saatiin runsaasti. Toinen syy oli, että ArcScenellä ilman stillkuvavälivaihetta tuotettavien .avi-videoiden laatu osoittautui heikoksi, eikä videoita pystynyt näyttämään Satakuntaliitolla käytössä olleilla ohjelmilla kompressioiden yhteensopimattomuuden vuoksi.

Kuten kappaleessa 4.2.2 on selostettu, kullakin alueella oli oma ArcScene-dokumenttinsa, joka sisälsi kaikki kolmiulotteiseen malliin tarvittavat esikäsiteltyt datat kuten ilmakehän yhdistetyn maanpinnan sekä 3D-objektit ja -kameralinjat. Automaattisen prosessoinnin jäljiltä oli tarkastettava joitakin yksityiskohtia ennen kuin voitiin lähteä tekemään varsinaisia videoita. Ihmis- ja auto-objekteja saattoi olla teillä liian lähellä kameralinjaa, jolloin niitä oli siirrettävä käsin. Autot käännettiin tien suuntaisiksi yksitellen.

Kun 3D-malli oli tarkastettu ja kunnossa, kamera suunnattiin tuulivoimala-alueen keskelle ja kameralinja ajettiin kokeeksi useilla eri nopeuksilla ilman raskaita objektipuita. Reaaliajassa niitä ei olisi pystynyt laskemaan, ja lopullisiin videoihin tarvittava kuvamateriaali, jossa puut olivat mukana, laskettiin tyypillisesti yöaikaan. Erityisesti videoissa, joissa kuljetaan tietä pitkin tai muuten matalalla, puiden vilinä tulee helposti häiritseväksi jos vauhtia on liikaa. Koska puut oli pakko jättää pois

videokameran nopeutta valittaessa, puiden vilinän vaikutuksia lopulliseen videoon oli mahdotonta etukäteen ennustaa.

Animaatioon tarvittavat .bmp-kuvat laskettiin ArcScenessä aluksi 30 fps:n kuvataajuudella. Useimmissa tapauksissa videot oli lopulta tehtävä pienemmällä kuvataajuudella vauhdin hidastamiseksi. Samalla kuvamateriaali jaettiin useaan osaan erillisiä videoita varten, jotta yksittäisen videon kestosta ei olisi tullut liian pitkä.

Kuvataajuutta pienennettiin, koska muuten videoista olisi tullut levottomia – kamera olisi yksinkertaisesti edennyt liian nopeasti. Lopullisissa videoissa kuvataajuus on 20-30 fps. Yleissääntönä voidaan pitää, että mitä korkeampi kuvataajuus, sitä pehmeämmältä liike näyttää kuvassa. Kuvataajuuden alentaminen lisää välkyntää ja nykimistä videoissa ja siten huonontaa laatua. Elokuvaluksessa yleisin kuvataajuus on 24 kuvaa sekunnissa, joka on myös elokuvateatterien esitysstandardi. PAL-televisiolähetyksissä kuvataajuus on 25 kuvaa sekunnissa, ja 50 fps:n taajuutta käytetään joissakin teräväpiirtotuotannoissa. Nykiminen on jo melko häiritsevää kuvataajuuden ollessa 20 ja tätä pidettiin ehdottomana alarajana videoissa. Videoita varten olisi voitu periaatteessa laskea enemmänkin kuvia, jolloin videoista olisi saatu miellyttävämpiä katsella, mutta tallennustilan rajallisuus sekä laskentaan käytettävissä oleva aika asettivat rajoituksia kuvamäärälle.

Lopuksi MATLAB:illa tehtiin informaatiokuvat, ja ne sekä varsinaisen videon kuvat yhdistettiin .avi-videoksi FFmpeg-ohjelmistolla. Kaikki kuvat olivat .bmp-muodossa. Joka kolmas kuva määriteltiin avainkehyykseksi (*keyframe*). Videokoodekkina käytettiin Microsoft MPEG-4 V2:ta (*MPEG-4 part 2 Microsoft variant version 2*).



Kuva 28. Alueen 17 erään videon alussa näkyvä infokuva.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä on kuvattu suurelta osin automatisoitu suurten datamäärien käsittelyä ja havainnollistamismateriaalin tuotantoa varten kehitetty tuulivoimala-alueiden 3D-mallinnusprosessi. Tutkimusprojektin kuluessa onnistuttiin kehittämään käsin tehtävän työn määrää selvästi vähentäviä menetelmiä. Jokaisen alueen kohdalla samanlaisena toistuvat tehtävät kuten laserkeilaus- ja ilmakuva-aineiston sekä 3D-objektien esikäsittely ja lopulta mallin kokoaminen käsitellyistä datoista ArcScenessä onnistuttiin automatisoimaan. Käsin tehtäväksi jäi osa videoiden tekovaiheista, kameralinjojen piirtäminen sekä niiden ja 3D-objektien hienosäätö. Algoritmien kehittäminen ja MATLAB- ja Python-ohjelmointi oli varsin vaativaa, mutta tämä mahdollisti alueisiin tarvittavan aineiston automaattisen käsittelyn usealla tietokoneella samanaikaisesti ja erityisesti yöajan hyödyntämisen laskennassa. Olisi ollut erittäin hidasta ja vaivalloista tehdä kaikki aineiston rajaus- ja muut editointitoimenpiteet käsin ArcScenessä.

Mallinnettavat tuulivoimala-alueet olivat pinta-alaltaan melko suuria – laajimmillaan noin 17 neliökilometriä – ja niissä oli paljon yksityiskohtia kuten puita. Näin ollen tietokoneella sekä automaattisesti että myös manuaalisesti käsiteltävän datan määräkin kasvoi suureksi. Rajallinen laskenta- ja tallennuskapasiteetti pakotti erilaisten kompromissien tekoon sekä prosessien automatisointiin ja optimointiin, kuten edellä jo on kuvattu. Kompromisseja oli tehtävä mallin tarkkuuden suhteen: kaikkia maastossa todellisuudessa olevia puita ja rakennuksia ei voitu ottaa mukaan.

Aineiston käsittely oli projektin alkaessa erittäin hidasta: yhden alueen laserkeilaus- ja ilmakuva-aineiston käsittelyyn kului tietokoneelta yli 10 tuntia. Tätä saatiin nopeutettua pariin tuntiin. Samoin yhteen videoon tarvittavien stillkuvien laskeminen vei aluksi mm. puuobjektien monimutkaisesta rakenteesta johtuen lähes vuorokauden. Parannusten jälkeen aikaa kului noin kolmannes vähemmän.

Kappaleessa 4.3 on selostettu alkuperäisiin ilmakuviin liittyviä ongelmia, kuten lentolinjarajat ja kappaleessa 5.3 videoiden teossa ilmenneitä haasteita. Videoiden perusongelma oli se, että niistä tuli helposti liian nopeita. Ongelmana oli erityisesti projektin alkuvaiheessa myös se, että korkealla ilmassa kamera eteni samaa vauhtia kuin alempana. Miellyttävän katselukokemuksen aikaansaamiseksi kameralle tulee edetä sitä hitaammin, mitä lähempänä maata ollaan. Projektin edetessä ongelma saatiin MATLAB'in avulla suurimmalta osin korjattua.

Jatkokehittäminen ja tehostaminen on useimmiten mahdollista, kun kyseessä on monimutkainen ja pitkälle automatisoitu menetelmä. Kuvankäsittelyä olisi ollut mahdollista vielä optimoida nopeuden ja tuloksena olevien kuvien laadun suhteen. Yleisestikin aineiston esikäsittelyn nopeutta olisi ehkä voitu parantaa. Lisäksi malleissa puut ovat melko harvassa verrattuna oikeaan metsään, ja ne voisivat olla vielä realistisemman näköisiä. Tietokoneiden käsittelykapasiteetti asettaa kuitenkin rajoituksensa puuston parantamiselle.

Satakuntaliitolle luovutettiin tuotetun materiaalin, kuten ohjelmakoodien, videoiden ja 3D-maastomallien, lisäksi suurin osa tausta-aineistoista kuten ilmakuvat ja osa laserkeilausaineistosta. Kaikki 18 videota ovat nähtävillä Youtube-sivustolla [40]. Videoita esiteltiin lisäksi videotykillä yleisölle lokakuun 2012 aikana neljässä tilaisuudessa Honkajoella, Noormarkussa, Kokemäellä ja Eurajoella. Tilaisuuksissa oli nähtävillä kunkin paikkakunnan lähistölle ehdotetut tuulivoimala-alueet ja niistä laadittu havainnollistamismateriaali. Linkit koko havainnollistamismateriaaliin kameralinjat mukaanlukien löytyvät osoitteesta <http://www.satakuntaliitto.fi/vmk1ehdotus> (kohdassa Satakunnan vaihemaakuntakaava 1 → Ehdotusvaihe 1 → ...).

Aiheeseen liittyen voidaan vielä mainita, että Satakuntaliiton maakuntahallitus päätti 19.11.2012 Porissa pitämässään kokouksessa jatkaa Satakunnan vaihemaakuntakaavan 1 ehdotuksen suunnittelun täydentämistä. Ehdotusvaiheen lausunnoissa useat kunnat esittivät tarkennuksia ja lisäyksiä kaavassa osoitettaviin alueisiin. Viranomaisneuvotteluissa pidettiin tärkeänä laatia lisää havainnollistamismateriaalia maisemavaikutusten arvioimiseksi erittäin herkkien kulttuurihistoriallisesti arvokkaiden alueiden lähialueilla, kuten Sammallahdenmäen maailmanperintökohteen (alue 15, josta ei tehty 3D-mallia) sekä Köyliön kansallismaiseman (alueet 16 ja 17) näkyvyysvyöhykkeillä. Kuntien ja muiden sidosryhmien kanssa tullaan käymään lisäneuvotteluita alueiden rajausten ja lisäysten perusteista, ja tavoitteena on, että maakuntavaltuusto hyväksyy vaihekaavan joulukuussa 2013, jonka jälkeen kaava lähetetään ympäristöministeriön hyväksyttäväksi.

Alla olevassa kuvassa 29 on vielä esimerkkinäkymä mallinnetulta alueelta 16.



Kuva 29. Alueen 16 3D-malli (Maanlevonkangas) noin 420 metrin korkeudelta kuvattuna.

LÄHTEET

- [1] Satakuntaliitto, ”Satakunnan vaihemaakuntakaava 1 - Ehdotusvaihe 1”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.satakuntaliitto.fi/vmk1ehdotus>. [Haettu 29. lokakuuta 2013].
- [2] Satakuntaliitto, ”Satakunnan vaihemaakuntakaava 1”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.satakuntaliitto.fi/vmk1>.
- [3] Satakuntaliitto, ”Mannertuulialueet Satakunnassa”, 2011. [Verkossa]. Saatavana: <http://www.satakuntaliitto.fi/sites/satakuntaliitto.fi/files/tiedostot/linkki1ID937.pdf>. [Haettu 11. marraskuuta 2013].
- [4] ”Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja 2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta”, [Verkossa]. Saatavana: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:FI:PDF>. [Haettu 4. tammikuuta 2013].
- [5] Motiva Oy, ”Uusiutuvan energian käyttö Suomessa”, [Verkossa]. Saatavana: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/uusiutuvan_energian_kaytto_suomessa. [Haettu 4. tammikuuta 2013].
- [6] Työ- ja elinkeinoministeriö, ”Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008”, 2008. [Verkossa]. Saatavana: http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus_311008.pdf.
- [7] VTT, ”Suomen tuulivoimatilastot”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/?lang=fi>. [Haettu 4. tammikuuta 2013].
- [8] Satakuntaliitto, ”Satakunnan ilmasto- ja energiastrategia”, 2012. [Verkossa]. Saatavana: <http://www.satakuntaliitto.fi/satailme>.
- [9] Ympäristöministeriö, ”Tuulivoimarakentamisen suunnittelu - Työryhmän esitys tuulivoimarakentamisen kaavoitusta, vaikutusten arviointia ja lupamenettelyjä koskevaksi ohjeistukseksi. Ympäristöministeriön raportteja 19/2011.”, Helsinki.
- [10] Suomen tuuliatlas, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>. [Haettu 4. tammikuuta 2013].
- [11] Ympäristöministeriö, ”Suomen Natura 2000 -alueet”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=1752&lan=fi>. [Haettu 4. tammikuuta 2013].
- [12] Finavia Oyj, ”Lentoesteet”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.finavia.fi/tietoafinaviasta/lentoesteet>. [Haettu 4. tammikuuta 2013].

- [13] Maa- ja metsätalousministeriö, ”Valtakunnallisen korkeusmallin uudistamistarpeet ja -vaihtoehdot. Työryhmämuistio, Helsinki 2006.”, 2006. [Verkossa]. Saatavana: http://www.hare.vn.fi/upload/Asiakirjat/10349/89592_mmm_trm2006_14.pdf. [Haettu 21. tammikuuta 2013].
- [14] Geodeettinen laitos, ”Korkeusmallit”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.fgi.fi/fgi/fi/teemat/korkeusmallit>. [Haettu 21. tammikuuta 2013].
- [15] M. Törmä, ”Yleiskuvaukset laserista kaukokartoituksessa”, [Verkossa]. Saatavana: <http://foto.hut.fi/~markus/Mrs/Ins/laser.html>. [Haettu 17. tammikuuta 2013].
- [16] K. Mäkinen, ”Tähtäimessä koko Suomi - Uusi korkeusmalli syntyy keilaten”, *Positio* 3/2008, s. 24-27, 2008.
- [17] Maanmittauslaitos, ”Laserkeilaustekniikka”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/laserkeilausaineistot/laserkeilaustekniikka>. [Haettu 17. tammikuuta 2013].
- [18] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ”Common Lidar Data Exchange Format - .LAS Industry Initiative”, [Verkossa]. Saatavana: http://www.asprs.org/a/society/committees/lidar/lidar_format.html. [Haettu 10. tammikuuta 2013].
- [19] Wikipedia, ”Tavujärjestys”, [Verkossa]. Saatavana: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Tavuj%C3%A4rjestys>. [Haettu 10. tammikuuta 2013].
- [20] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), ”LAS Specification Version 1.2”, 9.2.2008. [Verkossa]. Saatavana: http://asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v12.pdf. [Haettu 20. joulukuuta 2012].
- [21] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), ”LAS Specification Version 1.4 - R12, 10 June 2012”, [Verkossa]. Saatavana: http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r12.pdf. [Haettu 14. tammikuuta 2013].
- [22] J. Vilhomaa, H. Laaksonen, ”Valtakunnallinen laserkeilaus - testityöstä tuotantoon”, *The Photogrammetric Journal of Finland*, vuosik. 22, nro 3, s. 82-91, 2011.
- [23] Maanmittauslaitos, ”Laserkeilausaineiston tuotekuvaus”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/laserkeilausaineisto>. [Haettu 14. tammikuuta 2013].
- [24] ESPA Systems Oy, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.espasystems.fi>. [Haettu 18. joulukuuta 2012].
- [25] Metsäkeskus, ”Suomen Metsäkeskuksen metsävaratiedon laatuseloste”, 6. marraskuuta 2012. [Verkossa]. Saatavana:

- http://www.metsakeskus.fi/fi_FI/c/document_library/get_file?uuid=87035474-22da-4aa7-8b7d-9e00fbc362c2&groupId=10156. [Haettu 16. tammikuuta 2013].
- [26] Metsäkeskus, ”Metsäinventointi uudistuu - Laserkeilaus on osa metsäinventointia”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.metsakeskus.fi/documents/10156/32535/Laserkeilaus+on+osa+mets%C3%A4inventointia.pdf>. [Haettu 16. tammikuuta 2013].
- [27] ESRI Finland Oy, ”Hyvää metsänhoitoa paikkatiedon avulla”, [Verkossa]. Saatavana: http://www.esri.fi/referenssit/hyvaa_metsanhoitoa_paikkatiedon_avulla/. [Haettu 16. tammikuuta 2013].
- [28] ESRI Inc., ”ESRI Shapefile Technical Description”, July 1998. [Verkossa]. Saatavana: <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>. [Haettu 8. tammikuuta 2013].
- [29] ESRI Inc., [Verkossa]. Saatavana: <http://www.esri.com/about-esri/history>. [Haettu 9. tammikuuta 2013].
- [30] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), ”LASer (LAS) File Format Exchange Activities”, [Verkossa]. Saatavana: <http://asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html>.
- [31] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), ”ASPRS LIDAR Data Exchange Format Standard Version 1.0”, 9.5.2003. [Verkossa]. Saatavana: http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v10.pdf. [Haettu 20. joulukuuta 2012].
- [32] Maanmittauslaitos, ”Avoimien aineistojen tiedostopalvelu”, [Verkossa]. Saatavana: <https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta>.
- [33] CSC, ”PaITuli -paikkatietopalvelu”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.csc.fi/tutkimus/alat/geotieteet/paikkatieto/paituli>.
- [34] Finnmap (FM-International Oy), ”Laserkeilausaineiston toimitusraportti, Pirkanmaa ja Lounais-Suomi 2010”, Helsinki, 2010.
- [35] Maanmittauslaitos, ”Ilma- ja ortokuvien indeksikartat”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/ilmakuvat/ilma-ortokuvien-indeksikartat>. [Haettu 18. joulukuuta 2012].
- [36] Fingrid Oyj, ”Johtoalue”, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kunnossapito/johtoalue/Sivut/default.aspx>.
- [37] LAStools, [Verkossa]. Saatavana: <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools>.
- [38] FFmpeg, [Verkossa]. Saatavana: <http://ffmpeg.org>.
- [39] MathWorks, ”Classification Using Nearest Neighbors - k-Nearest Neighbor

Search Using a kd-Tree”, [Verkossa]. Saatavana:
<http://www.mathworks.se/help/stats/classification-using-nearest-neighbors.html>.
 [Haettu 21. joulukuuta 2012].

- [40] Satakuntaliitto, ”Satakuntaliiton videot”, [Verkossa]. Saatavana:
<http://www.youtube.com/user/satakuntaliitto>. [Haettu 21. joulukuuta 2012].
- [41] Satakuntaliitto, ”Satakunnan vaihemaakuntakaava 1 - Osallistumis- ja arviointisuunnitelma OAS”, 2011. [Verkossa]. Saatavana:
<http://www.satakuntaliitto.fi/linkkitiedosto.aspx?taso=1&id=942&sid=386>.
- [42] Motiva Oy, ”Tuulivoima ja asenteet hankepaikkakunnilla - Asukaskyselyiden tuloksia”, [Verkossa]. Saatavana:
http://www.motiva.fi/files/3336/Tuulivoima_ja_asenteet.pdf. [Haettu 12. joulukuuta 2012].
- [43] R. Sibson, ”A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation”, *Interpolating Multivariate Data*, New York, Wiley & Sons, 1981, s. 21-36.
- [44] J. Vilhomaa, ”Uuden valtakunnallisen laserkeilaukseen perustuvan korkeusmalli-tuotannon käynnistäminen Maanmittauslaitoksessa”, *Maanmittaus* 85:2, s. 28-37, 2010.